



**UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE OBRAS CIVILES**

**UNA SOLUCIÓN A LA BAJA DURACIÓN DE LAS PISTAS DE HORMIGÓN EN LA
MINERÍA SUBTERRÁNEA**

Pruebas realizadas en mina Codelco División Andina.

Memoria para optar al Título de Ingeniero Constructor

CARLOS ALBERTO BÁEZ URZÚA

Profesor Guía
NICOLAS MORENO SEPULVEDA

SANTIAGO DE CHILE
ENERO 2014

*A mis padres por su esfuerzo y paciencia durante este proceso,
A mis hermanos por su compañía y apoyo,
A mi novia por su compañía y aliento.
A mi futuro hijo Joaquin que lo espero con ansias.*

AGRADECIMIENTOS

Al Sr. Nicolás Moreno Sepúlveda, director de la escuela de obras civiles de la UNAB, quien siempre tuvo la disponibilidad de ayudarme y orientarme con un buen consejo en los momentos difíciles.

Al Sr. Cesar Belmar Alvares, Gerente departamento técnico y estudio Remavesa S.A. por su ayuda y preocupación.

Al Sr. Jorge Salgado Aravena, Gerente de calidad en Remavesa S.A. por su preocupación y orientación.

Al Sr. Ricardo Santibáñez Geologo de Xtreme Mining por su ayuda en la obtención de datos en Cedelco División Andina.

Gracias a mis familiares, quienes siempre me apoyaron en esta tarea.

A todos ellos, Muchísimas gracias.

Índice de contenidos

CAPITULO 1	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1. Presentación del tema	1
1.2. Antecedentes generales	3
1.3. Contextualización	4
1.4. Problematicación	5
1.5. Preguntas de investigación	7
1.6. Justificación del tema	7
1.7. Objetivos	8
1.7.1. Objetivo General	8
1.7.2. Objetivos específicos	8
1.8. Metodología de la investigación	8
1.9. Resultados esperados	9
CAPITULO 2	10
MARCO TEÓRICO	10
2.1. Hormigones en la minería subterránea	10
2.2. Hormigones alta resistencia	10
2.3. Situación normativa	11
2.4. Hormigones reforzados con fibras de acero	12
2.4.1. Características generales	12
2.4.2. Propiedades mecánicas	13
2.5. Cepillado de pavimento	15
2.5.1. Ventajas	16
2.5.2. Pavimentos que requieren cepillado	18
2.5.3. Evaluación del pavimento	20
2.5.4. Índice de serviciabilidad	23
2.5.5. Vida útil	23
2.5.6. Equipo de cepillado	26
2.5.7. Información sobre el agregado	29
2.5.8. Situación normativa	29
2.6. Definición de IRI	30
2.6.1. Modelo matemático del IRI	30
Capitulo 3	34
IMPLEMENTACIÓN DE LA SOLUCIÓN	34
3.1. Introducción	34
3.2. Los pavimentos en la mina subterránea Codelco División Andina	34
3.3. Condiciones existentes en mina subterránea	38
3.4. Mediciones	42
3.4.1. IRI	42

3.4.2. Actividad en terreno	43
3.4.3. Secuencia de trabajo	44
3.4.3.1. En nivel 17 de la siguiente forma	44
3.4.3.2. En nivel 16 de la siguiente forma	44
3.4.4. Medición de IRI en pavimentos nuevos nivel 17	45
3.4.4.1. Resultados entregados	46
3.4.5. Medición de IRI pavimentos antiguos nivel 17	46
3.4.5.1. Resultados entregados	47
3.4.6. Medición de IRI actual pavimentos antiguo tramo prueba cepillado Nivel 17	48
3.5. Aceleración vibratoria	49
3.5.1. Proveedor Cesmec S.A	49
3.5.2. Objetivo de la vibración	49
3.5.3. Situación normativa	49
3.5.4. Procedimiento	51
3.5.5. Resultados entregados	52
3.5.5.1. Nivel 17 transporte campaña 01	53
3.5.5.2. Nivel 17 transporte campaña 02	53
3.5.5.3. Nivel 16 LHD producción campaña 01	54
3.5.5.4. Nivel 16 LHD producción campaña 02	54
3.5.5.5. Calles nuevas gardilcic campana 01	55
3.5.5.6. Calles nuevas gardilcic campaña 02	55
3.6. Cepillado de la superficie tramo de prueba Hormigón T-100 MPa Nv-17	56
3.6.1. Actividades en terreno	56
3.6.2. Cepillado en mina subterránea	57
3.6.3. Toma de datos tramo de prueba	58
3.6.4. Medición de desgaste de discos PC-150	60
3.6.5. Medición de desgaste de discos PC-6000	60
3.6.6. Medición de IRI durante cada Cepillado en tramo de prueba Nv-17	61
Capítulo 4	63
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	63
4.1. Conclusiones	63
4.2. Recomendaciones	64
Bibliografía	66
Anexo Fotográfico	69

Índice de tablas

Tabla 1.1.: Configuración de carga Equipo <i>LHD</i> .	5
Tabla 2.5.1.: Guía para la recolección de datos del pavimento	21
Tabla 2.5.2.: Deterioros a corregir con el cepillado	22
Tabla 3.3.1.: Exigencia IRI	41
Tabla 3.4.1.: Equipos y mano de Obra Utilizada	43
Tabla 3.4.2.: Medición de IRI Pavimentos nuevos nivel 17	45
Tabla 3.4.3.: Medición de IRI Pavimentos antiguos nivel 17	47
Tabla 3.4.4.: Medición de IRI pavimentos antiguos tramo de prueba nivel 17	48
Tabla 3.5.1.: Ponderaciones de frecuencia	50
Tabla 3.5.2.: Tiempos de exposición máximos	50
Tabla 3.5.3.: Recursos utilizados para medición de vibraciones	52
Tabla 3.6.1.: Recursos utilizados en cepillado de pistas	56
Tabla 3.6.2.: Cuadro resumen Rendimientos cepilladora	58
Tabla 3.6.3.: Vida útil discos PC-150	60
Tabla 3.6.4.: Vida útil discos PC-6000	60

Índice de figuras

Figura 1.1.: Plano ubicación Mina Codelco División Andina	1
Figura 1.2.: Corte Transversal de una Galería	3
Figura 1.3.: Esquema del equipo <i>LHD</i>	5
Figura 1.4.: Empuje de equipo <i>LHD</i> sobre frontón de rocas	6
Figura 2.4.1.: Tipos de fibra ofrecidos en el Mercado	12
Figura 2.4.2.: Fibra de acero de extremos conformados, modelo <i>Twincone</i>	13
Figura 2.4.3.: Aspecto interior del HRFA	13
Figura 2.4.4.: Tenacidad del HRFA, reflejada por el área bajo la curva Carga-Deflexión	14
Figura 2.4.5.: Tenacidad detalle de fisuras Hormigón Normal y Hormigón HRFA	14
Figura 2.5.1.: Detalle de cepillado	16
Figura 2.5.2.: Carga Dinámica	17
Figura 2.5.3.: Diferencia entre cepillado y recapado	18
Figura 2.5.4.: Junta escalonada	19
Figura 2.5.5.: Índice de Serviciabilidad	22
Figura 2.5.6.: Secuencia de Restauración de pavimentos de hormigón	23
Figura 2.5.7.: Condición de rodadura IRI	24
Figura 2.5.8.: Escalonamiento para pavimento no armado	25
Figura 2.5.9.: Escalonamiento para pavimento armado	25
Figura 2.5.10.: Equipo para cepillado de pavimentos	26
Figura 2.5.11.: Cabezal con discos de corte diamantado	26
Figura 2.5.12.: Textura típica cotele	27
Figura 2.5.13.: Dimensiones para la textura del cepillado	28
Figura 2.5.14.: Diferencia entre cepillado y fresco	29
Figura 2.6.1.: Representación de masa suspendida y no suspendida en el Modelo del Cuarto de carro	31
Figura 2.6.2.: Equipos para medición de IRI	33
Figura 3.2.1.: Galería confeccionada con hormigón H-50 MPa espesor 40 cm	35
Figura 3.2.2.: Deterioro producido por el tránsito de los equipos	36
Figura 3.2.3.: Espesor de 15[cm.] a ser reparado	37
Figura 3.2.4.: Colocación de hormigón H-80 MPa y T100 MPa	38
Figura 3.3.1.: Falta de iluminación en mina subterránea	39
Figura 3.3.2.: Superficie irregular en mina subterránea	40
Figura 3.3.3.: Acumulación de Agua en galerías mina subterránea	41
Figura 3.4.1.: Equipos para medición de IRI	43
Figura 3.4.2.: Proceso de auscultación Nivel 17	44
Figura 3.4.3.: Proceso de auscultación Nivel 16	44
Figura 3.4.4.: Procesamiento de datos en sistema computacional	45
Figura 3.4.5.: Grafico medición de IRI pavimentos nuevos nivel 17	46
Figura 3.4.6.: Grafico medición de IRI pavimentos nuevos nivel 17	47
Figura 3.4.7.: Grafico medición de IRI pavimentos antiguos tramo de prueba nivel 17	48
Figura 3.5.1.: Forma de colocación sensor triaxial	51
Figura 3.5.2.: Criterio de evaluación para aceleración vibratoria	51

Figura 3.5.3.: Equipo para medición de vibraciones	52
Figura 3.5.4.: Grafico aceleración vibratoria nivel 17A	53
Figura 3.5.5.: Grafico aceleración vibratoria nivel 17B	53
Figura 3.5.6.: Grafico aceleración vibratoria nivel 16A	54
Figura 3.5.7.: Grafico aceleración vibratoria nivel 16B	54
Figura 3.5.8.: Grafico aceleración vibratoria calles nuevas Gardilcic A	55
Figura 3.5.9.: Grafico aceleración vibratoria calles nuevas Gardilcic B	55
Figura 3.6.1.: Equipo para cepillado PC-150 <i>Diamond Grinding</i>	57
Figura 3.6.2.: Medición de IRI en tramo de prueba durante el cepillado	61

Listado de Acrónimos.

ASTM: American Society for Testing and Materials

ACI: American Concrete Institute

A/C: Relación agua cemento

AASHTO: American Association of State Highway and Transportation Officials

Aeq: Aceleración equivalente

Cps: Calle de producción

DAND: División andina

GTN: Galería de transporte norte

HRFA: Hormigón Reforzado con fibras de acero

IRI: índice de irregularidad internacional

JT: Jefe de turno

Leq: Ruido equivalente

LHD: Load, Haul, Damp; carguío, transporte y vaciado

MS: Mina subterránea

NPS: Nivel de presión sonora

Nch: Norma chilena

Nv: Nivel

Of: Oficial

RPH: Reparación de pavimentos de hormigón

XC: Cruzado

RESUMEN

Codelco División Andina, es el primer productor de cobre del mundo, comenzó su explotación en el año 1970, posee explotación a rajo abierto y subterránea, esta última es la más compleja de explotar debido a las condiciones desfavorables existentes al interior de la mina. Actualmente en la mina subterránea se presenta el problema de la baja duración de las pistas de rodado en producción *LHD* y transporte.

En la mina subterránea, las galerías son de forma aboveda, tanto en el nivel 16 y nivel 17, las pistas están confeccionadas de un hormigón estructural tipo H-50 MPa el cual luego de 9 meses de utilización presenta serios daños debido a las solicitaciones. Estas son producidas por los equipos *LHD* y tolvas de transporte, este deterioro produce disminuciones en los rendimientos y aumento en los costos de mantención de los equipos, además de una mayor contratación de operarios debido al mínimo confort durante los turnos.

Codelco en busca de una solución, realizó sectores de prueba en el cual se pican los sectores con deterioro aproximadamente 15 cm de profundidad y se coloca un hormigón H-80 MPa, sobre el cual se aplica un hormigón de sacrificio reforzado con fibras de acero tipo Densitop T-100 MPa de 2,5 cm de espesor con la técnica de fresco sobre fresco, pero luego de un tiempo el deterioro se produce de igual manera.

El objetivo principal de este trabajo es dar una solución a la baja duración de las pistas de producción *LHD* y transporte en la mina subterránea Codelco División Andina.

Como solución, se propuso el cepillado de la superficie a través de cepilladora PC-150 *Diamond Grinding*, que tiene las dimensiones adecuadas para poder desplazarse en las galerías de la mina, a través de esta técnica se pueden realizar programas de mantención, para así mantener un IRI óptimo de trabajo que no afecte los rendimientos y mantenga un confort adecuado para los operadores.

Como Codelco no realiza controles de IRI y por lo tanto no contábamos con un indicador de referencia IRI en los pavimentos de la mina, se debió realizar mediciones del estado de IRI y aceleración vibratoria, para poder constatar el deterioro de los pavimentos y el confort de los operadores durante su jornada de trabajo.

Para tener un indicador inicial de IRI se midieron los pavimentos nuevos los cuales entregamos resultados de IRI 5,7 m/km, este valor se tomara como óptimo. Además las mediciones de los pavimentos antiguos nos entregamos resultados de IRI 7 a 12 m/km.

Las mediciones de aceleración vibratoria indicaron que en el nivel 16 las jornadas de trabajo pueden extenderse máximo 3,5 a 6 horas continuas en algunos sectores lo que nos corrobora el valor IRI medido.

Durante el proceso de cepillado en el nivel 17 se midió el IRI entre cepillados lográndose resultados satisfactoria debido a que de un IRI inicial 8,56 m/km se logró disminuir a un IRI 6,43 m/km con dos pasadas.

De lo anterior podemos concluir que el cepillado de la superficie es una alternativa a tomar en cuenta como solución a la baja duración de las pistas de rodado.

Para realizar una mantención periódica de las pistas, a través del cepillado de la superficie, se recomienda la confección de los nuevos pavimentos y las reparaciones de los antiguos pavimentos en espesores mínimos de 15 cm en hormigón de sacrificio tipo Densitop T-100, y así tener un espesor adecuado para cepillar en reiteradas ocasiones.

Abstract

Codelco Division Andina is the first copper producer of the world, the strip mining began in 1970, it has an open pit and subterranean mine, the last one is the most complex due to the bad condition inside the mine. At the moment the subterranean mine has a problem, is the round stones track short duration in LDH production and transport.

In the subterranean mine, galleries are cavern shaped, levels 16 and 17, the tracks are made from structural concrete type H-50 MPa which after 9 months of usage it has serious damages due to the demanding usages. These damages are produced by LHD equipment and transport hoppers, this deterioration produces a decreasing in the performing and an increasing in expense in terms on maintenance of the equipments, apart from the operators hiring due to uncomfortable conditions of the shifts.

Codelco searched a solution, it made a testing area in which the damaged areas are poked, 15 cm deep approximately and a H-80 MPA concrete is put, in which a fiber steel concrete type Densitop T- 100 MPa 2,5 cm thickness with the cool over cool technique but after all the damage come back again.

The main target of this research is giving a solution for the short duration of the LHD production tracks and transport in Codelco Division Andina subterranean mine.

As a solution a planed down was propose in the surface through the planer down PC-150 Diamond Grinding, that has the appropriate measures in order to be able to road in the mine galleries, through this technique maintenance programs can be made in order to maintain an optimal IRI at work that doesn't affect the performance and also has an proper comfort for the operators during their shifts.

In order to have an initial IRI new asphalts were measured which had an 5,7 m /km IRI, this result is considered optimal. Apart from the old asphalts measures were given from 7 to 12 m/km IRI.

The Vibratory acceleration measurements indicated that in the 16 level the working day could be extended from 3,5 to 6 hours in some areas that corroborates measured IRI.

During the plane down process in the 17 level The IRI was measure between plane downs making satisfactory and important results due to an initial 8,56 m/km IRI a decreased was reached a 6,46 m/km IRI with two rounds.

The previous research can make us think that the plane down of the surface is an alternative to be considered as a solution for the round stones track short duration.

In order to make a constant maintenance of the tracks, through the plane down of the surface, start over again is recommended in terms of making new asphalts and fixing of the old asphalts in minimal densities of 15 cm in the concrete type Densitop T-100, in that way a proper density can be can be plane down many times.

Capítulo 1

Introducción

1.1 Presentación del Tema

La Corporación Nacional del Cobre de Chile, Codelco, es el primer productor de cobre del mundo y una de las empresas más rentables de la industria chilena. Posee las mayores reservas de cobre del planeta, está en la avanzada del conocimiento y la tecnología, y cuenta con una organización y un modelo de negocios que incentivan la creación de valor.

La división Andina opera el yacimiento Río Blanco, cuya riqueza era conocida desde 1920. Pero los intentos por iniciar su explotación no se concretaron hasta medio siglo después, en 1970.

Está ubicada a ochenta kilómetros al noreste de Santiago, entre 3.700 y 4.200 metros sobre el nivel del mar. En la actualidad esta división realiza la explotación de minerales en la mina subterránea de Río Blanco y en la mina a rajo abierto Sur Sur.

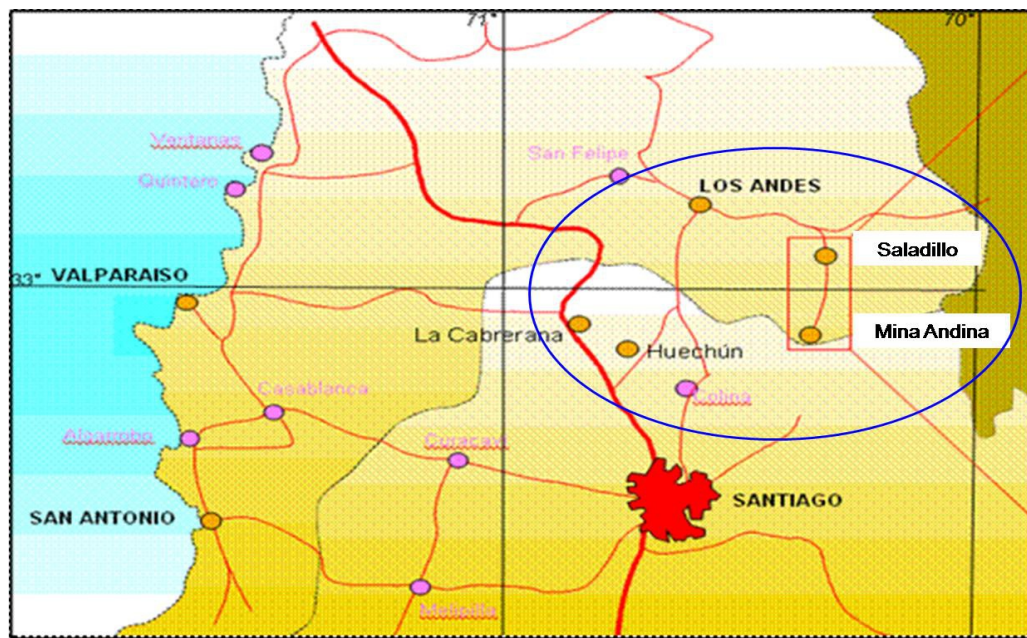


Figura 1.1: Plano ubicación Mina Codelco División Andina. [Fuente: Memoria Codelco, 2011]

Andina produce unas 188.494 toneladas métricas anuales de concentrados de cobre que son materia prima fundamental para obtener el metal refinado. Además coloca en los mercados 2.901 toneladas métricas de molibdeno al año.

Codelco División Andina cuenta con extracciones a rajo abierto y subterránea esta última es la más compleja y extrema, debido a las condiciones adversas a las que se

exponen los trabajadores y los equipos que la componen, es por esto que constantemente se está buscando maximizar los rendimientos, los tiempos de traslados y el confort de los operadores en los distintos procesos de producción.

Las innovaciones buscan solución a los distintos problemas que surgen, a medida que las operaciones se hacen más automatizadas y se avanza en las áreas de extracción, una de las operaciones fundamentales en la minería subterránea, es el traslado del mineral y del personal a través de la red de túneles. A medida que se va avanzando en la extracción se van construyendo los túneles con forma abovedada pero con superficies muy irregulares, no aptas para el desplazamiento de los equipos.

La solución a este problema es el hormigonado para obtener pistas que permitan un traslado expedito y continuo de los equipos de producción, pero este hormigón debe tener características especiales, ya que los equipos que por las pistas transitan son de gran tonelaje. También se deben considerar las características de las aguas subterráneas que son altamente acidas, es por esto que los hormigones utilizados en la minería subterránea deben ser capaces de resistir todas estas solicitudes.

Otro punto importante son los tipos de equipos utilizados como el llamado SCOOP o LHD. (Load, Haul, Dump; carguío, transporte y vaciado), el cual es una especie de cargador frontal, diseñado especialmente para la minería, también está el camión tolva articulado que cargado pesa aproximadamente 90.000 kg

Actualmente se utiliza un hormigón estructural H - 50 (MPa), en caso de daños importantes, las reparaciones se realizan con un hormigón H-80 MPa, sobre el cual se coloca una capa de 2,5 cm de espesor de un hormigón de alta resistencia T-100 MPa reforzado con fibras de acero.

Esta denominación de T-100 corresponde a la marca comercial del producto **Densitop T-100** la que entrega resistencia del orden de los 100 MPa. Esta carpeta, es la que presenta daños debido a las cargas a las cuales son sometidos, es por esto que Codelco División Andina busca una solución, originado por la baja duración de las pistas de producción.

El presente trabajo tiene como objetivo encontrar una solución, a la baja duración de las pistas de producción a través del cepillado de la superficie (*Diamond Grinding*) y estandarizar una medida de IRI para la minería subterránea en División Andina, que no afecte los rendimientos en la producción y la salud de los operadores, la definición de IRI se entrega en el Capítulo 2.

Al encontrar este IRI Minero, se podrá tener una medida de alerta cuando se sobrepase el IRI óptimo y así programar una mantención adecuada de las pistas.

1.2 Antecedentes Generales

En la Minería Subterránea, una de las partes más importantes desde el punto de vista productivo son las pistas, ya que de ellas depende el traslado del mineral y de los trabajadores, para poder mantener el normal funcionamiento de las operaciones mineras, se requiere de pavimentos que soporten las solicitaciones, debido a esto se debe recurrir a materiales, que entreguen este normal funcionamiento, siendo el hormigón un material fundamental, es por esto, que el principal uso que se le da a los hormigones en la minería, es para confeccionar obras de pavimentación (carpetas de hormigón), pero realizar este tipo de obras en el interior de una mina subterránea, puede parecer en principio innecesario o poco rentable, esto es, debido a que en primer lugar, el suelo rocoso proporciona una excelente base de apoyo, y realizando algunos trabajos de nivelación, se podrían obtener una carpeta de rodado aceptable para los vehículos mineros.

En segundo lugar, el tiempo promedio que toma la explotación de un sector de producción minero, oscila aproximadamente entre 5 a 6 años, tiempo de vida útil extremadamente corto comparado con la de los pavimentos carreteros, que es aproximadamente de 20 años en el caso del hormigón.

De acuerdo a lo expuesto podría pensarse que el beneficio a obtener no es tan grande, sin embargo, hay que tener en cuenta algunos aspectos como la metodología empleada en la extracción del mineral, tipo de equipo utilizado en el transporte y carguío del mineral, costos por mantención y reparación de los equipos *LHD*, perdidas de rendimiento en equipos y problemas de salud en el personal, debido a condiciones de trabajo deficiente, además de lo mencionado, se deben tener en cuenta algunas limitaciones en el interior de la mina, tales como:

- 1) Espacios reducidos: Las galerías de una mina subterránea son de forma abovedada y sus dimensiones responden a los métodos de extracción y tipo de equipo utilizado, por esta razón, el espacio disponible en el interior de la mina, no es el más adecuado para realizar obras de pavimentación con equipos tradicionales.

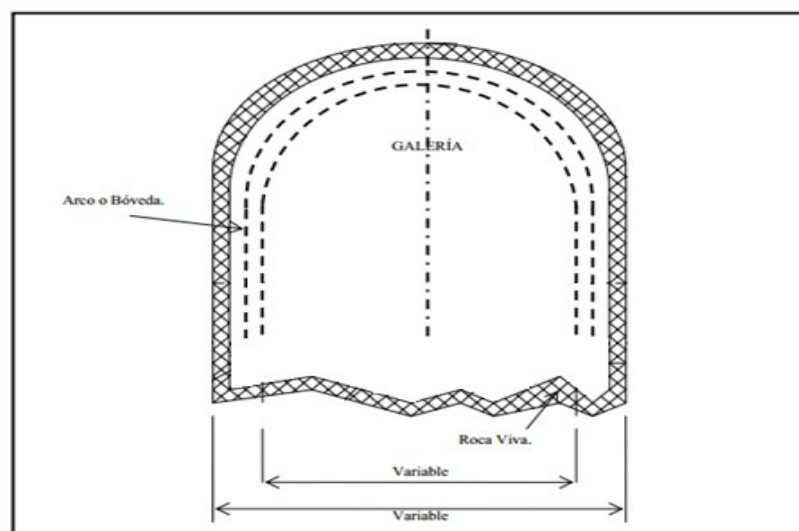


Figura 1.2: Corte Transversal de una Galería. [Fuente: Memoria Codelco 2011.]

- 2) Tiempo de construcción limitado (sectores en producción): La ejecución de las obras de hormigonado interrumpen las faenas propias de la mina, lo cual tiene un costo asociado a la pérdida de eficiencia en la producción, por eso, el tiempo de postura del hormigón debe ser el menor posible.
- 3) Condiciones agresivas para el hormigón: Si se producen infiltraciones de agua en el interior de la mina, dependiendo del volumen de escurrimiento, pueden producirse algunos problemas, tales como la socavación de bases de apoyo de la carpeta, formación de sustancias químicas como sulfatos, ácidos, cloruros, etc.
- 4) Falta de iluminación natural: Por tratarse de una mina subterránea, la ejecución de las labores de hormigonado, deben llevarse a cabo con el auxilio de luz artificial, lo cual también introducen dificultades a los trabajos de construcción.
- 5) Cargas de diseño: En el caso de los equipos de minería, estructuralmente fuertes y con una capacidad de carga relativamente grande, las cargas de diseño son bastante superiores, a las normalmente consideradas para otros hormigones.
- 6) Mantenición de pistas: Actualmente Codelco Andina no cuenta con un programa de mantención de pistas de acuerdo a indicadores como, la medición de IRI o en el caso del personal de la Aceleración Vibratoria.

Debido a los antecedentes anteriormente mencionados, es que Codelco División Andina está buscando una solución a la baja duración de las pistas de transporte y producción, a través de algún sistema que permita realizar el mantenimiento de estas en el menor tiempo posible.

1.3 Contextualización

El presente trabajo se desarrollará en un contexto de Proyecto denominado *Clúster*, que corresponde a buscar soluciones a problemas desafiantes que se presentan en la minería subterránea Codelco División Andina. El objetivo central, es solucionar la baja duración que presentan las pistas de rodado en los túneles de producción y transporte, en los niveles 16 y 17, para así mantener los rendimientos proyectados, esto mediante la aplicación de innovaciones tecnológicas, tanto a nivel de productos como equipos, para la conservación de mejores niveles de servicio en las pistas de rodado.

El alcance del presente trabajo, es poder desarrollar un sistema de conservación de las pistas, que requieran del menor tiempo posible, para no interferir con la producción.

1.4 Problematicación

El problema detectado esta dado por la baja duración de las pistas de rodado, de hormigón estructural H-50 MPa sobre el cual se coloca un hormigón de sacrificio *Densitop* T-100 MPa, para camiones y *LHD*.

Los tipos de equipos utilizados son, el llamado *SCOOP* o *LHD*. (Load, Haul, Dump; carguío, transporte y vaciado), el cual es una especie de cargador frontal, diseñado especialmente para la minería, y el camión tolva articulado que cargado pesa aproximadamente 90.000 kg

Tabla 1.1: Configuración de carga Equipo *LHD*.

EJE	VACIO	CARGADO
DELANTERO	11.700 kg	25.400 kg
TRASERO	14.080 kg	9.200 kg

Fuente: Elevación propia, 2013

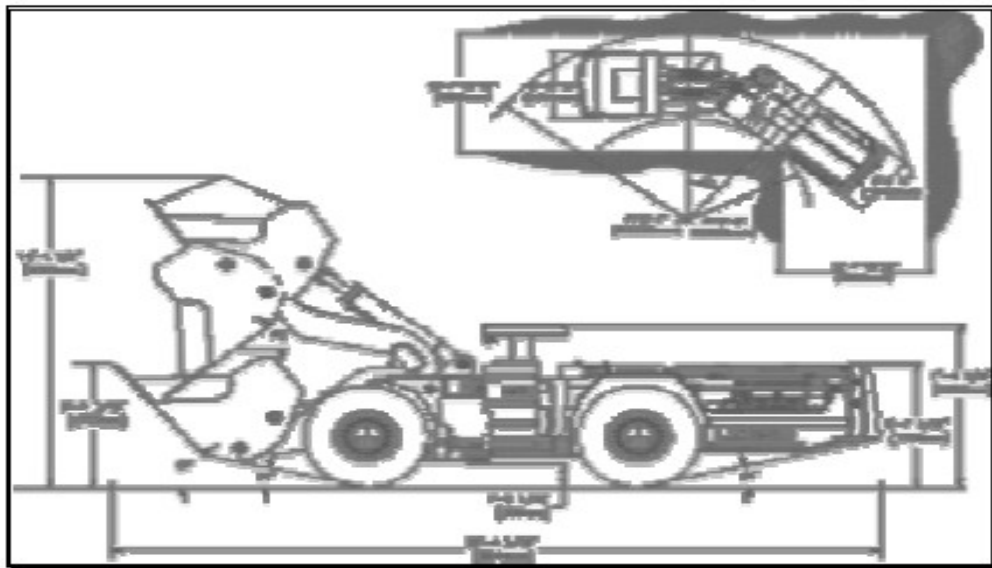


Figura 1.3: Esquema del equipo *LHD*. [Fuente: Tesis U.Austral 2009.]



Figura 1.4: Empuje de equipo *LHD* sobre frontón de rocas [Fuente: Tesis U. Austral 2009.]

Las solicitaciones y deterioros que soportan los pavimentos son:

- Carga producto de rodado de los neumáticos de alto tonelaje.
- Punzonamiento de las piedras que caen de las tolvas y son pisadas por los neumáticos.
- Arrastre de los baldes de los *LHD* al retirar el mineral de las galerías de producción y limpieza de las galerías de tránsito.
- Pérdida de adherencia en las pistas.

El deterioro se traduce en las mediciones de IRI comprendido entre 7-12, que genera demora en la circulación de los equipos *LHD*, encargados de cargar y transportar el mineral, obtenido en los puntos de extracción y llevado hacia los puntos de vaciado, además de bajar la velocidad de circulación de las tolvas que cargan de los buzones del nivel 17 y que transportan el mineral a los chancadores.

Lo mencionado, produce fuertes pérdidas de rendimiento en las faenas de producción, además, de los aumentos en los costos por conceptos de mantención, reparación de los equipos *LHD* y Tolvas de transporte y la necesidad de una mayor dotación de operadores, debido a jornadas más reducidas por las malas condiciones de la pista, es decir, una importante baja en la productividad.

Debido a que el tiempo es uno de los recursos más importantes en la minería y la reparación de los pavimentos de hormigón H-50 MPa y la carpeta de *DENSITOP* T-100 MPa, requieren entre 6 – 8 días, para poder dejarla operativa.

Motivo por el cual la División Andina de Codelco está buscando la solución más adecuada, por lo cual se definió implementar el sistema de Cepillado, para así mejorar

el IRI, dar mayor adherencia y aumentar la vida útil disminuyendo los tiempos de reparación de los pavimentos.

Para esta labor, no se puede ocupar cualquier tipo Cepilladora, debido a lo reducido de los espacios en el interior de las galerías, se debe seleccionar un equipo que cumpla con las dimensiones de largo y alto. La Cepilladora utilizada es una *DIAMOND GRINDING* modelo PC-150 de largo 6 m, ancho 2,5 m y altura de 2,5 m, este equipo actualmente se utiliza en el cepillado de pavimentos de hormigón y asfalto carreteros, donde los hormigones utilizados son normales H-30 MPa o H-35 MPa, otro uso que se le da, es el ranurado de pistas de aterrizaje y remoción de caucho en pistas de aterrizaje.

Como se indicó anteriormente, los hormigones utilizados en la mina son los H-50 MPa, H-80 MPa que son pavimentos estructurales y T-100 MPa que es un mortero de sacrificio reforzado con fibras de Acero, la cepilladora PC-150 jamás ha sido utilizada en el cepillado de hormigones con resistencia tan altas, por lo que se definió la necesidad de monitorear el comportamiento de la cepilladora, tanto en su rendimiento como en el desgaste de los discos.

La Cepilladora consta de un eje de un metro de ancho, con unos 200 discos de corte paralelos. El ritmo de avance, es del orden de 60 m²/hora en hormigones normales, La máquina Cepilladora suaviza la superficie, devastando los puntos altos del pavimento, actuando en un espesor máximo de un centímetro y dejando una textura acanalada, que favorece la adherencia de los vehículos y facilita el escurrimiento del agua.

1.5 Preguntas de Investigación

Teniendo en consideración los antecedentes descritos y la problemática planteada producto de las los altos tonelajes de los equipos, es clara la necesidad de efectuar conservación en las pista de producción. Las investigaciones en el ámbito vial, han desarrollado nuevas técnicas como solución a las altas cargas, que están expuestos los pavimentos de hormigón, además de equipos que nos permiten conservar los trabajos realizados, como por ejemplo hormigones de alta resistencia y equipos de cepillado de superficie de hormigón de alto desempeño. Cabe hacernos la pregunta:

¿El cepillado de la superficie de las pistas es realmente una alternativa a considerar, como solución definitiva, en comparación a reparaciones sucesivas de los hormigones de menores espesores, considerando los tiempos de puesta en servicio?

1.6 Justificación del Tema.

El cobre es un material fundamental en el desarrollo de tecnología y en la construcción, de un sin número de productos, por lo que países productores de este mineral les genera inmensos ingresos económicos. Es por esto, que día a día se busca optimizar y hacer más eficientes los procesos mineros, invirtiendo en investigación y ensayando nuevas tecnologías y materiales, que permitan soportar las cargas y los ataques químicos, a los cuales son expuestos los pavimentos durante el proceso de extracción y transporte del mineral.

Se han debido diseñar pavimentos con hormigones de alta resistencia, que son capaces de resistir todas la sollicitaciones a las cuales son expuestos, pero por la experiencia obtenida, no basta con construir un pavimento, sino que se debe tener un adecuado sistema de mantención, para que los deterioros no afecten los rendimientos y aumenten los costos de mantención de los equipos durante los procesos de extracción.

1.7 Objetivos

1.7.1 Objetivos Generales

- Encontrar una solución a la baja duración de las pistas de producción en la minería subterránea a través del cepillado de la superficie.

1.7.2 Objetivos Específicos

- Encontrar un IRI óptimo para la Minería subterránea y así poder fijar un parámetro de control para la mantención de las pistas, fijando valores a los pavimentos nuevos para contar con un parámetro de control.
- Realizar mediciones de IRI antes del cepillado y entre cepillado, para poder determinar las mejoras que experimentan las pistas.
- Realizar medición de la aceleración vibratoria que se transmite desde la pista al operador y determinar si las jornadas de trabajo son adecuadas.
- Mediante el análisis de un tramo experimental ya Cepillado con Cepilladora PC-150 *Diamond Grinding*, determinar los beneficios generados.

1.8 Metodología de la Investigación

La metodología a utilizar para el desarrollo del presente trabajo, consiste en:

- Recopilar información bibliográfica de los hormigones de alta resistencia y de la técnica del cepillado de la superficie.

- Realizar mediciones de IRI y aceleración vibratoria en mina subterránea Codelco División Andina
- Análisis técnico de las mediciones realizadas para determinar la calidad de las pistas.
- Definir un tramo específico en donde se aplicara la técnica del cepillado de las pistas para con esto realizar el estudio.
- Estudiar un tramo tratado con la técnica del cepillado de la superficie, para determinar las mejoras obtenidas.
- Realizar un procesamiento de las mediciones obtenidas y su respectivo análisis de resultados.
- Registrar datos de rendimientos y medición de desgaste de discos para un posterior análisis.

1.9 Resultados Esperados

- Determinar si el cepillado de la superficie es una solución, a la baja duración de las pistas en Codelco División Andina.
- Determinar si esta solución es adecuada, para su implementación en los túneles de producción y transporte en la minería subterránea.

Capítulo 2.

Marco Teórico

2.1 Hormigones en la minería subterránea.

Antes de la década de los 80 las pistas en la minería subterránea para el transporte del material y del personal, eran básicamente una base estabilizada, construida con el mismo material obtenido en la extracción, que debía cumplir una granulometría definida, el diseño de la pista consistía en la colocación de rieles de acero en el centro y costados longitudinalmente y cubiertos con una capa de base estabilizada compactada, los rieles cumplían la función de proteger la pista durante el proceso de carguío por los equipos *LHD*, pero este tipo de pista, requería de una constante mantención a través de motoniveladora y rodillos compactadores, para mantener pistas adecuadas para el transporte del mineral, pero no es hasta mediados de la década de los 80, se propone la incorporación del hormigón en las pista de producción, combinado con base estabilizada.

Desde entonces se ha venido avanzando en las propiedades de los hormigones, para obtener una mezcla con un menor costo de hace 30 años atrás y que sean capaces de resistir las sollicitaciones generadas por los equipos. En la actualidad la totalidad de las pistas en la minería subterránea (Codelco) son proyectadas con hormigones de alta resistencia mayores a H-50 MPa, incluso con hormigones H-100 MPa en sectores de prueba.

2.2. Hormigones Alta Resistencia.

El término “alta resistencia” es relativo, pues supone la obtención de resistencias superiores a las más altas obtenidas comúnmente. De esta manera, la clasificación de alta resistencia debe utilizarse para denominar los hormigones cuyo diseño y control deben utilizarse materiales y tecnologías especiales (Montenegro, 1993).

En Chile hoy en día, de acuerdo a la experiencia de los últimos años en hormigones en obra y en plantas de hormigón premezclados, se puede clasificar como hormigones de alta resistencia a aquellos cuya resistencia a la compresión a los 28 días es superior a 50 MPa.

El progreso en el campo de la tecnología del hormigón y del control de calidad, conjuntamente con los nuevos requerimientos de las estructuras, han conducido al desarrollo de hormigones de resistencias cada vez más elevadas. Realizando una breve reseña histórica, se puede notar que en los principios del siglo XX el hormigón poseía una resistencia aproximada de 14 MPa. En los años 30, este valor se había casi duplicado. Al comienzo de los años 50, un hormigón con resistencias a la compresión de 34 MPa, era considerado de alta resistencia. En la década de los 60, hormigones de resistencia entre 41 y 52 MPa, eran de uso comercial en EE.UU., al comienzo de los 70 se produjeron hormigones de 62 MPa.

En los últimos 30 años se observa un desarrollo notable, tanto en lo que respecta a medios de producción y dosificación, como al conocimiento más acabado de las características reológicas y propiedades mecánicas del hormigón.

Estos avances han permitido la obtención de propiedades mecánicas, trabajabilidad y durabilidad superiores a las habitualmente usadas, en hormigones convencionales, por ejemplo, hoy en día en EE.UU., ya se comercializan hormigones con una resistencia especificada de 100 MPa.

Hay que reconocer que la definición de alta resistencia es una función de la región geográfica, en regiones donde se produce comercialmente hormigón de 60 MPa, de resistencia a la compresión, alta resistencia podría estar en el rango de 80 a 100 MPa.

Sin embargo en regiones donde el lote tope de resistencias para los hormigones comercializados sea de 50 MPa, se podrá llamar hormigones de alta resistencia a uno de 70 MPa de resistencia a la compresión.

2.3. Situación Normativa.

La norma NCh 170 Of. 52, la cual estuvo vigente hasta el año 1985, clasificó a los hormigones de más alta resistencia como clase E, los cuales deberían tener una resistencia superior a los 30 MPa. El criterio utilizado en la actual norma difiere al criterio utilizado en la norma anterior, este último era “determinista”, mientras que el de la actual, es un criterio “probabilista”.

Tal diferencia implica, que la actual norma reconoce y acepta el valor esperado, en otras palabras, acepta que el hormigón puede fallar, o bien puede ocurrir que no siempre alcance el valor esperado. Tal criterio parece ser bastante más acertado y realista que el de la norma anterior, todos los que fabrican, controlan o trabajan con hormigón, saben que por muy bien que este se fabrique o coloque, no siempre se obtiene el resultado esperado. La gran cantidad de variables, que influyen en la determinación de la resistencia y el poco control que existe en algunos casos sobre alguna de ellas, hacen que los resultados obtenidos no correspondan a lo especificado.

Es por lo tanto, esta “dispersión” la que en términos de probabilidad, acepta la norma actual NCh 170 Of. 85. La norma antigua fue reemplazada el año 1985 por la NCh 170 Of. 85, la cual se puso en vigencia en diciembre del mismo año. Como todas las normas oficiales, esta ha sido declarada oficial de la República de Chile, según el decreto N°.404, del Ministerio de Obras Públicas, y reemplaza a las Normas NCh 170 Of. 52 y NCh 172 Of. 52.

En la actual norma, los hormigones son clasificados hasta el grado H-50 MPa, para una resistencia a la compresión especificada $f_c = 50$ MPa, medida en probeta cúbica de 200 mm de arista, a la edad de 28 días.

La norma Chilena de Diseño y Cálculo de Hormigón Armado NCh 430, la cual está basada en el código Norteamericano ACI 318, hace referencia a hormigones de hasta 35 MPa de resistencia a la compresión medida en probeta cilíndrica de 150 mm de

diámetro y 300 mm de altura a 28 días e edad (esta denominación corresponde a un grado H-40 MPa aproximadamente en probeta cúbica de 200 mm de arista).

2.4. Hormigón reforzado con fibras de Acero (HRFA).

El hormigón reforzado con fibras, es el hormigón formado por un conglomerado hidráulico, generalmente cemento Portland, áridos finos y gruesos, agua y fibras discontinuas y discretas. La proporción adecuada de estas fibras, es la que aporta al hormigón un mayor o menor refuerzo, que se traduce en una mejora en sus características de tenacidad, control de fisuración y resistencia a flexotracción.

Para que este añadido tenga valor, debe producirse adherencia, entre la masa del hormigón y la fibra añadida, de forma que se genere una mezcla con distribución uniforme, que convierta al hormigón en un material dúctil que reduzca su fisuración. La inmersión de la fibra hace que ésta soporte parte de las tensiones internas generadas por las cargas.

2.4.1. Características generales.

Las fibras de acero son pequeños alambres, fabricados en acero con bajo contenido de carbono, en diámetros comprendidos entre 0.3 a 1.0 mm y longitudes que oscilan entre 10 a 75 mm. Se ofrecen en variadas presentaciones, habiéndolas lisas, onduladas y más recientemente con extremos conformados de forma tal que generan un fuerte anclaje con la matriz del hormigón.

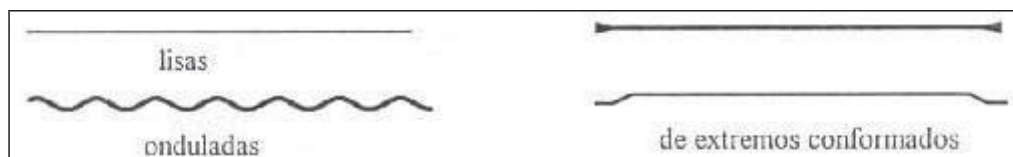


Figura 2.4.1: Tipos de fibra ofrecidos en el Mercado [Fuente: Tesis U. de Chile]

Se dosifican típicamente a razón de 20 a 160 kg de fibras por m^3 de hormigón, dependiendo del tipo de fibras, de las características del hormigón, así como del grado de respuesta que de ellas se requiera.

Las fibras mostradas corresponden a las clasificadas de extremos conformados, que en este caso se refiere a terminaciones en forma de cono en ambos extremos como se ilustra en la Figura 2.4.2. En diámetros de 1 mm y 54 mm de longitud, se dosifican usualmente a razón de 20 a 80 kg/m^3 .

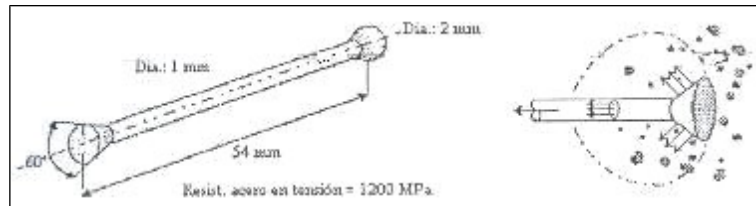


Figura 2.4.2: Fibra de acero de extremos conformados, modelo *Twincone* [Fuente: Tesis U. de Chile]

Cada kilo de estas fibras, contiene del orden de 3.000 unidades, que equivalen a 160 metros de alambre. Estas se distribuyen aleatoria y homogéneamente, en el volumen, como se aprecia en la Figura 2.4.3, que da una idea del alto grado de presencia de estas fibras, formando un verdadero tejido en todas las direcciones, con la misma regularidad que lo hace la grava.

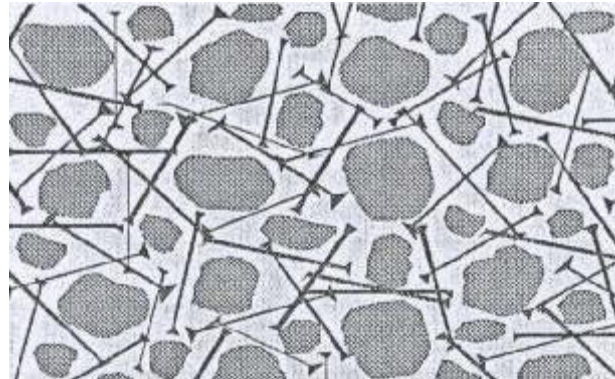


Figura 2.4.3: Aspecto interior del HRFA [Fuente: Tesis U de Chile.]

Esta alta presencia de fibras, genera una pasta más cohesiva que inhibe la sedimentación y exudación, durante el proceso de colocación y en el endurecimiento evitando las fisuras por retracción, limitando el desarrollo de las microfisuras, cada vez que son intersectadas por una o varias fibras, obteniéndose en definitiva una superficie con bajo contenido de agua y menos fisuras, y por lo tanto un hormigón homogéneo y sano. No es de extrañar entonces, que en algunas literaturas también se hable de hormigón "micra reforzado" (Johnston, 1984).

2.4.2. Propiedades mecánicas.

En la Figura 2.4.4, se muestran las características del comportamiento en flexotracción del material, de donde se desprende, que tanto el hormigón tradicional como el HRFA, en primera instancia tienen un comportamiento idéntico y prácticamente lineal hasta el punto, en que aparece la 1era fisura en la cara traccionada. En ese momento, en un hormigón tradicional, esa fisura se propaga instantáneamente a toda la sección de la probeta, generándose el colapso abrupto propio de todo material frágil.

En el HRFA, aunque las fibras están orientadas en todas las direcciones y repartidas en toda la masa de hormigón, siempre existen algunas, que actúan de puentes entre

ambas partes de la probeta seccionada por la fisura transmitiendo los esfuerzos a semejanza de lo que haría un armado convencional Figura 2.4.5 A

Comportamiento en flexión del HRFA.

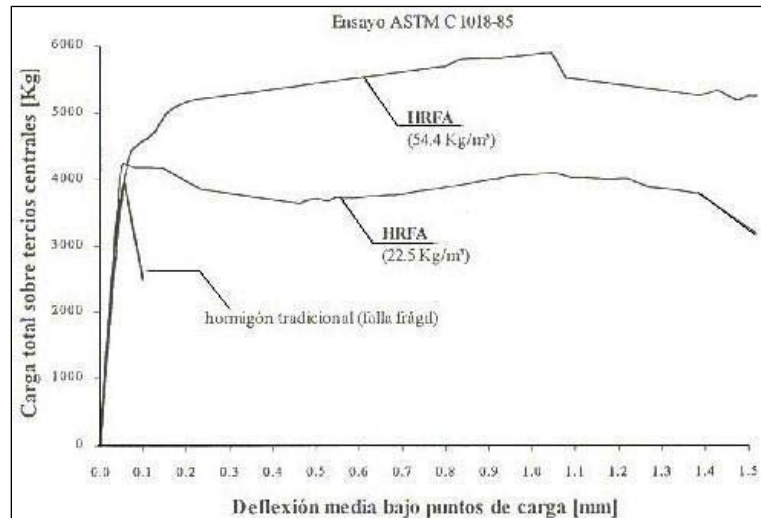


Figura 2.4.4: Tenacidad del HRFA, reflejada por el área bajo la curva Carga-Deflexión [Fuente: Detroit, 1987.]

Las curvas carga-deflexión, muestran la gran resistencia post-primera fisura, que puede alcanzar el HRFA, dependiendo entre otros factores de la calidad del hormigón (contenido de cemento, cantidad y tamaño de los áridos, relación A/C, etc.), del tipo de fibra, específicamente del grado de anclaje que pueda lograr con la matriz de hormigón (por ello son mejores las de extremos conformados), del largo de la fibra y de la dosis que se esté empleando.

De esta forma, mientras más largas y mayor cantidad de unidades se tengan por m^3 de hormigón, mayor será la probabilidad que esta primera fisura encuentre fibras interceptándola. Cuando la dosis de refuerzo es suficiente (del orden de 50 kg/m^3), al continuar el ensayo se forman nuevas fisuras en otros puntos Figura 2.4.5 B, dejando ver que la primera, deja de ser un punto débil en el elemento. De esta manera se ilustra el efecto de tenacidad que aportan las fibras al hormigón.



Figura 2.4.5: Tenacidad detalle de fisuras Hormigón Normal y Hormigón HRFA [Fuente: Tesis U de Chile.]

Las mismas curvas de la Figura 2.4.4, reflejan el comportamiento elasto-plástico del HRFA, lo que se traduce en una alta capacidad de absorción de energía, al ser ésta proporcional al área bajo la curva (tenacidad). Este ensayo se encuentra normalizado por la ASTM bajo el código C 1018-85, en el cual además de registrarse la resistencia a la flexo a la 1era fisura (o límite elástico) y resistencia última, se definen índices de tenacidad a ser comparados con los de un hormigón tradicional, en que el área bajo la curva se limita al "triángulo" formado por la zona elástica. En este aspecto, la energía requerida hasta la rotura en un hormigón reforzado con fibras de acero es del orden de 50 veces superior a la del hormigón tradicional.

Esta misma capacidad de absorción de energía, explica los mejores rendimientos del HRFA a la fatiga., sin embargo, se cuenta con datos de referencia que arrojan capacidades del orden de 200 a 250 veces superior a la, de un hormigón tradicional (2 millones de ciclos sin llegar a fallar, aplicando una carga máxima entre 90 y 95% de la resistencia en flexión estática).

Otra característica del HRFA que está ligada a su alta capacidad de absorción de energía, es su resistencia al impacto. En efecto, en experiencias antes realizadas, se han registrado resistencias del orden de 10 veces por sobre a la del hormigón sin fibras, aunque con una muy alta dispersión.

El uso del hormigón reforzado con fibras de acero en pavimentos ha encontrado gran aceptación en países como EE.UU., Canadá y de Europa en general, actualmente se están usando en la minería subterránea ya que debido a las solicitudes que producen los equipos estos las resisten de mejor manera debido a que su adición aporta al hormigón propiedades que apuntan a mejorar las siguientes condiciones:

- Resistencia a la fatiga, producto de su alta capacidad de absorción de energía.
- Control de la fisuración, al inhibir el desarrollo de las microfisuras producidas por efecto de la retracción.
- Comportamiento en flexión, elevando su resistencia, y convirtiéndolo en un material dúctil.

Además, provee otras características interesantes, como el incremento de la resistencia al impacto, y el aporte al control de la sedimentación y exudación, contribuyendo a obtener una superficie más estable al desgaste, que combinada con la menor fisuración superficial se traduce en una mayor durabilidad.

2.5. Cepillado de pavimentos.

La restauración de pavimentos de hormigón (RPH), puede realizarse de varias maneras, dependiendo del grado de deterioro que presente el hormigón, dentro de los tipos de restauraciones, se pueden nombrar las siguientes:

- Reparación del espesor completo.
- Reparación del espesor parcial
- Restauración de las transferencias de carga.
- Sello de juntas y grietas.
- Bacheo superficial con mezcla en caliente.
- Cepillado de la superficie.

De todas las reparaciones nombradas anteriormente, el cepillado (*Diamond Grinding*) es una de las alternativas más económicas y rápidas de realizar, siendo un procedimiento usado para restaurar o mejorar la calidad de rodadura en un pavimento.

La restauración de una superficie de rodaje, mejora la capacidad de soportar el tránsito aumentando de esta manera el valor agregado de un pavimento existente. Aunque el cepillado, ha sido un proceso de restauración que ha estado disponible desde la década de los sesenta, los desarrollos recientes y una mayor experiencia, lo hacen merecedor de un tratamiento más a fondo. En particular, la competitividad en costo del cepillado se ha visto aumentada por el desarrollo de nuevos equipos de alto rendimiento.



Figura 2.5.1: Detalle de cepillado [Fuente: El Autor]

2.5.1 Ventajas

El cepillado prolonga la vida útil de un pavimento, proporcionando una superficie nivelada, lisa y suave al tránsito. Remueve los defectos de la superficie, que se forman con el paso de los años y los efectos del clima, así como los defectos del proceso constructivo. Una carretera lisa y nivelada, tiene una mayor duración bajo los efectos de las cargas de tránsito repetidas.

Uno de los motivos es que las cargas dinámicas o de impacto se reducen (International Grooving and Grinding Association, 1989). Cuando los camiones, viajan sobre protuberancias y hendiduras rebotan verticalmente sobre su suspensión produciendo como resultando una carga dinámica Figura 2.5.2.

La carga dinámica, es mayor que la carga estática producida por el peso del vehículo. Esto aumenta las tensiones en los materiales del pavimento y como consecuencia disminuye la vida útil de la carretera. Proporcionando una superficie lisa, el cepillado reduce la carga dinámica, o de impacto, de vehículos o aviones.

El cepillado es efectivo en todo tipo de pavimentos de hormigón, desde aeropuertos y carreteras interurbanas a calles de ciudad. Un motivo es su bajo costo. En la mayoría de los casos el costo del cepillado es menos de la mitad del costo de un recado asfáltico. Esta competitividad en el costo conjuntamente con la eliminación de los problemas que son propios de los recados asfálticos (ahuellamiento, ondulamiento y baja resistencia al patinaje) hacen que el cepillado sea y deba ser parte, de un programa de Restauración de Pavimentos de Hormigón (RPH).

La experiencia ha demostrado que el cepillado, por sí sólo puede ser más durable que un recado asfáltico. El cepillado ayuda a los Organismos Públicos, a reducir los costos de mantención de caminos, manteniendo una superficie de hormigón más durable (International Grooving and Grinding Association, 1989).

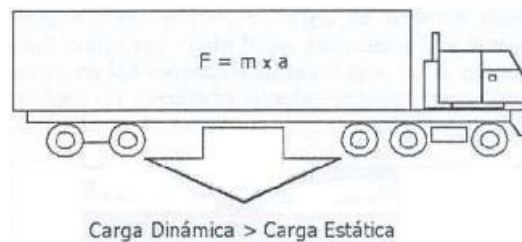


Figura 2.5.2: Carga Dinámica [Fuente: Synder, 1987.]

Los camiones que rebotan verticalmente debido a las protuberancias, provocan cargas dinámicas (de impacto) a medida que la masa del camión (m) acelera (a) hacia abajo sobre la suspensión. Una masa acelerada causa una fuerza mayor (F) que una masa estática.

El cepillado es normalmente "acuñado" para producir una transición suave con las estructuras de pavimento adyacentes y por lo tanto se aplica solamente, en donde es necesario. Por ejemplo, se puede solicitar el cepillado de únicamente las pistas de camiones (pistas externas), de una carretera de dos pistas por calzada.

Esto representa otra ventaja significativa en cuanto al costo. Un recado asfáltico, necesita que todas las pistas, bermas y rampas, sean recadas con objeto de mantener la elevación de la vía principal. Este tipo de recado, también necesita de cuñas de transición hacia las calles laterales y salidas hacia las carreteras principales.

El cepillado únicamente necesita ser aplicado en donde sea necesaria la restauración de la calidad de rodadura, debido a que no modifica la elevación de la superficie del pavimento.

El cepillado no obliga a efectuar cambios a las características del drenaje de un pavimento urbano. Los recapados asfálticos, ocupan parte de las acequias y soleras reduciendo su capacidad de drenaje. En época de lluvias, el agua puede sobrepasar la altura reducida de la solera, inundando las aceras o retrocediendo hacia las plantas de tránsito Figura 2.5.3.

Ninguna de estas situaciones mencionadas, es deseable y ambas constituyen una preocupación para los ingenieros. El cepillado mejora la capacidad de rodaje del pavimento sin interferir con las condiciones del drenaje.

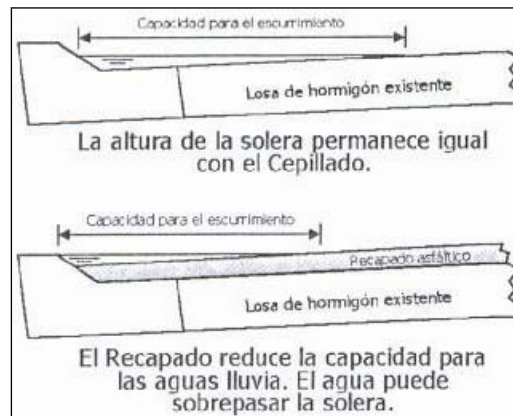


Figura 2.5.3: Diferencia entre cepillado y recado [Fuente: International Grooving and Grinding Association, 1989]

Los recados asfálticos reducen la altura de la solera y la capacidad de almacenamiento de la cuneta para el escurrimiento de las aguas lluvia.

El cepillado aumenta la fricción y seguridad de la superficie de un pavimento antiguo. Después del cepillado la superficie queda con un dibujo tipo "cotelé" el que proporciona canales, para que el agua se desplace bajo las ruedas de los vehículos. Así se reduce el potencial de hidropneumático.

El cepillado es un procedimiento ampliamente aceptado. El cepillado puede remover las protuberancias de los pavimentos nuevos, reperfilear las pistas ásperas y alisar un pavimento en conjunto, con un sistema completo de restauración. Aunque el tamaño del equipo, puede ser más pequeño para el cepillado de protuberancias en pavimentos nuevos, se aplican muchos de los mismos principios usados para el cepillado restaurativo.

2.5.2 Pavimentos que requieren Cepillado

El cepillado restaurativo se usa para reperfilear pavimentos de hormigón que hayan desarrollado cualquiera de las siguientes condiciones:

- Escalonamiento o alabeo de losas.
- Deformaciones superficiales causadas por neumáticos con clavos y/o cadenas.
- Pendiente inadecuada para el drenaje.
- Superficie demasiado desgastada.
- Rugosidad (IRI) excesiva.

El aumento sostenido en la cantidad de camiones y los mayores pesos por eje, más allá de la cantidad prevista por los diseñadores, ha ocasionado juntas escalonadas, en especial en las pistas de camiones de los pavimentos de hormigón sin barras de refuerzo.

El escalonamiento de juntas, se ve favorecido ante suelos con mal drenaje, diseños tipo "tina de baño" (que acumula agua en la superficie), y materiales de base erosionables. Estos factores no siempre fueron adecuadamente considerados, cuando se colocó el pavimento original y por lo tanto contribuyeron al bombeo y a la creación de vacíos.

El escalonamiento de juntas es probablemente el motivo más importante para aplicar el cepillado Figura 2.5.4. "Las juntas elevadas" de las losas onduladas o alabeadas también se producen bajo ciertas condiciones. Espaciamientos demasiado largos, entre juntas, y bases de soporte rígidos, dan como resultado losas alabeadas que son más altas en los extremos (juntas) que en la mitad de la losa. El cepillado puede remover estas "juntas elevadas".

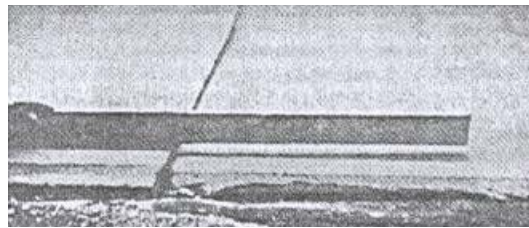


Figura 2.5.4: Junta escalonada [Fuente: International Grooving and Grinding Association, 1989.]

En las zonas más frías y en áreas montañosas, con presencia de nieve y hielo, el uso de neumáticos con clavos y cadenas, puede desgastar la superficie de un pavimento. La gravedad del desgaste depende de la dureza del mortero y del agregado grueso usado en el hormigón. En donde se produzca el desgaste de la superficie, el cepillado restaurará la uniformidad, la lisura, y mantendrá una superficie de hormigón óptima para el tránsito de todo tipo de vehículos. Una alternativa plausible al cepillado para estas situaciones es la de un recapado de hormigón adherido.

El cepillado también aumenta la resistencia al patinaje. Aunque la superficie pulida, no es común en los pavimentos de hormigón, a veces se presentan bajo volúmenes de tránsito extremadamente pesados. El desgaste de la superficie reduce la resistencia al patinaje. El cepillado restaura, estos pavimentos con un tránsito muy pesado a una condición más segura y más resistente al patinaje.

2.5.3 Evaluación del Pavimento

La evaluación de pavimentos es un proceso de varios pasos. Primero se requiere de la recolección de la información necesaria, para determinar la causa y extensión actual de deterioro. El paso más importante en el proceso, es el uso de la información sobre el estado actual para la evaluación del costo-efectividad de las estrategias de reparación.

La tabla 2.5.1 proporciona lineamientos para la recolección de información, sobre el estado del pavimento. Investigaciones detalladas del deterioro, deberían indicar y evaluar todos los tipos de deterioro. Los deterioros estructurales tales como el bombeo, pérdida de apoyo, rotura de esquinas, juntas y grietas transversales activas deben indicarse claramente en la hoja de datos de la investigación de deterioros. Estas áreas necesitarán de una mayor atención previa al cepillado.

TABLA 2.5.1: Guía para la recolección de datos del pavimento.

TAREA	DESCRIPCIÓN/OBJETIVOS
1.-Recolección de información acerca del diseño.	Recolección de información del diseño original <ul style="list-style-type: none"> •Fecha de Construcción •Espesor de la Losa •Diseño de las juntas (Barras y Diámetro) •Refuerzo de Acero •Espaciamiento de juntas •Materiales del hormigón (procedencia y tipo de áridos) •Materiales de base, suelo de subrasante •Previsiones para el drenaje •Cargas de Tránsito
2.-Efectuar investigación del Deterioro.	Recolectar información sobre el comportamiento <ul style="list-style-type: none"> •Serviciabilidad actual •Índice del perfil •Investigación de grietas (tipo, gravedad, cantidad) •Medición del escalonamiento •Drenaje •Resistencia al patinaje •Pruebas no destructivas de deflexión.
3.-Evaluar Información	Identificar las causas y la extensión del deterioro. <ul style="list-style-type: none"> •Analizar desarrollo de Huecos. •Confeccionar lista de alternativas de restauración •Evaluar necesidad de información adicional •Sacar muestra de sondaje si se necesita complementa información adicional. •Evaluar necesidad drenaje.
4.-Pruebas de Laboratorio	Determinar propiedades del material
5.-Evaluación Final	Conclusión de las causas y extensión del deterioro. Desarrollar alternativas de reconstrucción que reparen las condiciones existentes y prevengan su repetición futura.

Fuente: Roman, 1985

TABLA 2.5.2: Deterioros a corregir con el cepillado.

PROCEDIMIENTO	DETERIORO A CORREGIR	REPARACIÓN O MEDIDA PREVENTIVA
Cepillado	<ul style="list-style-type: none"> •Escalonamiento •Aspereza por ondulamiento •Pulido •Desgaste por neumáticos con clavos •Mal declive de drenaje 	<ul style="list-style-type: none"> •Reparación •Reparación •Preventivo •Reparación •Preventivo

Fuente: Roman, 1985

El cepillado por sí mismo, no aumenta o restaura la capacidad estructural de un pavimento, sin embargo, aumenta efectivamente la capacidad de soportar tránsito al mejorar la serviciabilidad Figura 2.5.5

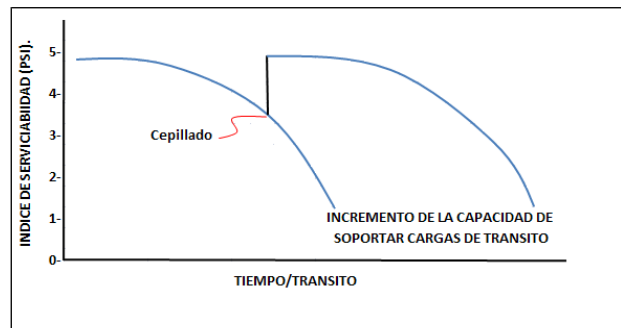


Figura 2.5.5: Índice de Serviciabilidad [Fuente: Federal Highway Administration, 1987.]

El cepillado aumenta la capacidad de soportar tránsito, al incrementar la serviciabilidad del pavimento.

Sin embargo, si la información de deterioro indica solamente problemas de patinaje (falta de adherencia) o de rugosidad (IRI), el cepillado es efectivo aún cuando se use sólo.

Las reparaciones estructurales necesarias, tales como estabilización de losas, reparaciones de profundidad total y parcial y la restauración de la transferencia de carga, deben ser previas al cepillado. A continuación del cepillado, se vuelven a sellar las juntas. La figura 2.5.6 muestra la secuencia de las operaciones.

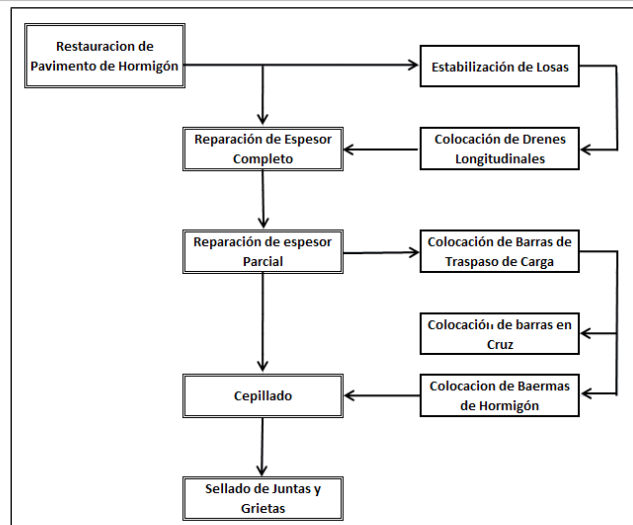


Figura 2.5.6: Secuencia de Restauración de pavimentos de hormigón [Fuente: Demonstration Projects Program, 1987.]

Secuencia adecuada de las técnicas RPH. No todos los proyectos requieren de todos los procedimientos. Los procedimientos más comunes se indican en un cuadrado de doble línea.

2.5.4 Índice de Serviciabilidad

Un parámetro usado para intervenir un pavimento es el índice de serviciabilidad psi de un pavimento. El valor usado normalmente varía entre 3,5 y 4,0. Con una serviciabilidad de entre 3,5 y 4,0, se efectúa una evaluación del pavimento para determinar qué se requiere para su restauración.

La American Concrete Pavement Association y la International Grooving and Grinding Association, recomiendan un PSI de alerta de entre 3,8 y 4,0. La cantidad de reestructuración requerida será menor, más manejable y menos costosa, que si se aplica a un índice de serviciabilidad más bajo. La extensión de la vida útil como resultado del cepillado y la RPH también será significativamente mayor.

2.5.5. Vida Útil

La vida útil de un pavimento cepillado, es el tiempo que transcurre entre el término del proyecto (de cepillado) y la aparición de escalonamiento a un grado que se requiera de un nuevo tratamiento. La vida útil depende de muchos factores.

- 1.- Tasa de carga de tránsito.
- 2.- Diseño del pavimento existente (espesor de losa, espaciamiento de juntas, tipo de base, tipo de suelo de la subrasante, capacidad de drenaje subterráneo y tipo de berma).
- 3.- Efectividad del sello de juntas.

- 4.- Clima (Índice de congelamiento, precipitación).
- 5.- Estado del pavimento en el momento de la restauración.
- 6.- RPH (trabajos adicionales que se hagan).
- 7.- Estado del sistema de transferencia de cargas.

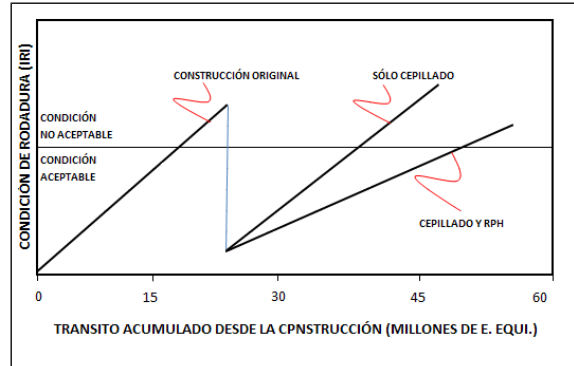


Figura 2.5.7: Condición de rodadura IRI [Fuente: Federal Highway Administration, 1987]

La vida útil de un proyecto de cepillado, se mide por la cantidad de cargas (o tiempo) que pase antes que el rodaje se haga intransitable.

El cepillado puede prolongar la vida útil de un pavimento en 8 o más años cuando se efectúa en conjunto con otras técnicas de RPH. Los factores enumerados más arriba se combinan, para ejercer influencia en la rugosidad. Por ejemplo, un drenaje mejorado puede paliar los efectos de una mayor tasa de cargas de tránsito. Igualmente, un pavimento en malas condiciones en el momento del cepillado, no proporcionará una vida útil, tan prolongada como la que tendría si estuviera en buenas condiciones. La figura 2.5.7 ilustra la prolongación de la vida útil con el cepillado.

Los investigadores examinaron el efecto relativo del cepillado, aplicado en conjunto con otras técnicas. Las figuras 2.5.8 y 2.5.9 muestran la prolongación de la vida útil en función del tránsito (en términos de ejes equivalentes AASHTO) para un pavimento de hormigón simple con juntas y otro reforzado y con juntas, respectivamente.

Las figuras demuestran que el cepillado aumenta la capacidad para soportar tránsito en más de 8 millones de ejes equivalentes. Incluso una prolongación de la vida útil mayor se produce con mejoramientos estructurales ejecutados conjuntamente, especialmente con el mejoramiento del drenaje.

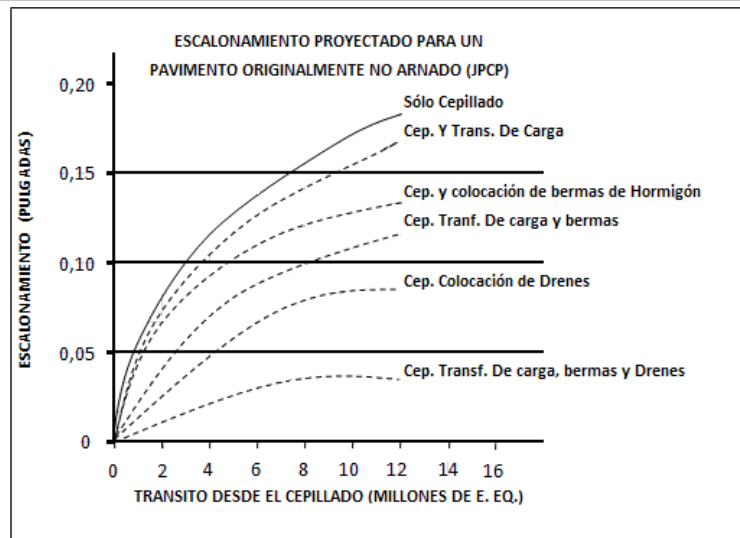


Figura 2.5.8: Escalonamiento para pavimento no armado [Fuente: Darter, 1987.]

Modelo del desarrollo de escalonamiento de juntas, en un pavimento de hormigón, sin barras de traspaso (JPCP). Las curvas se desarrollaron asumiendo los siguientes factores: espesor de losa de 9 pulgadas, espaciamiento de juntas promedio de 15,5 pies, base estable, subrasante tina y clima moderado.

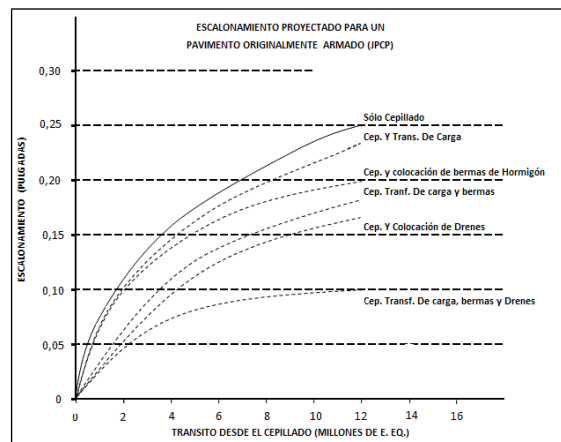


Figura 2.5.9: Escalonamiento para pavimento armado [Fuente: Darter, 1987.]

Modelo del desarrollo de escalonamiento de juntas en un pavimento de hormigón reforzado y con juntas (JRCP). Las curvas se desarrollaron asumiendo los siguientes factores: espesor de losa de 9 pulgadas, espaciamiento de juntas promedio de 30 pies, base granular, subrasante de grano fino y clima típico del medio oeste (de USA).

2.5.6. Equipo de Cepillado

La máquina cepilladora usa discos diamantados, que van montados en forma paralela en un cabezal cortante. Los tres aspectos más importantes de una máquina de cepillado, son el peso de la máquina, la potencia disponible para el cabezal y el cabezal cortante mismo. Los equipos de cepillado trabajan como un "cepillo de madera". Las ruedas frontales pasan sobre el escalonamiento o protuberancia, mientras que el cabezal cepilla el escalonamiento o protuberancia y así las ruedas traseras siguen por la huella ya alisada por el cabezal de la cepilladora.



Cepilladora PC-150



Cepilladora PC-6000

Figura 2.5.10: Equipo para cepillado de pavimentos [Fuente: El autor, 2012]

El cabezal de cepillado corta el hormigón. El cabezal consiste de varios discos diamantados colocados muy juntos, en un eje Figura 2.5.11. Generalmente son necesarios entre 54 a 59 cada 30 cm, para producir una superficie nivelada con una textura tipo cotelé Figura 2.5.12. El cabezal típico utilizado en grandes proyectos tiene entre 1,20 y 1,25 m de ancho. Las características del cabezal (en particular de los discos de corte) son función de múltiples condiciones, siendo la más importante la dureza del hormigón y sus agregados

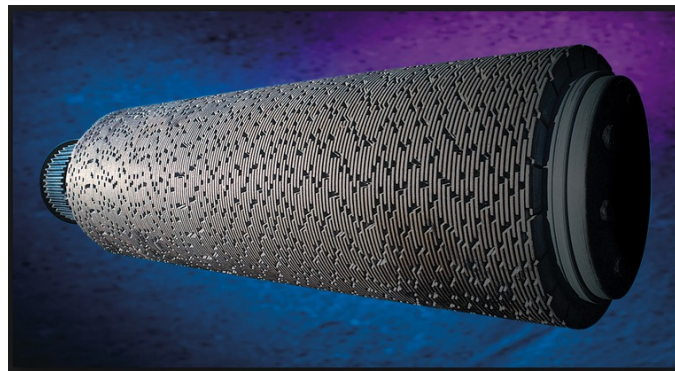


Figura 2.5.11: Cabezal con discos de corte diamantado [Fuente: Remavesa, 2012]



Figura 2.5.12: Textura típica cotele [Fuente: El autor, 2012]

Típica textura de tipo “cotele”. Importante destacar el incremento en la textura superficial de la superficie cepillada comparada con la superficie sin cepillar.

La selección de los discos tiene una importancia extraordinaria en el comportamiento del cepillado. Los tres factores que los fabricantes de discos y los contratistas consideran al seleccionar los discos, son el tamaño de los diamantes, su concentración y la adherencia con que estén incrustados al disco. Cada factor puede tener influencia en la productividad, costo y calidad de la superficie cepillada.

El factor más importante es la concentración de los diamantes. Puede disminuir o compensar los efectos, ya sea de la firmeza de incrustación o del tamaño de los diamantes. Esto se debe a que los diamantes son el material más duro conocido por el hombre. Una mayor cantidad de diamantes, hace que el cabezal sea más duro y proporcione un cortado más eficiente.

El tamaño de los diamantes, también tiene importancia en el rendimiento de los discos, velocidad de corte y precio del cabezal. Las partículas de diamante más grandes, son mejores para los tipos de agregado menos duros, mientras que los diamantes más pequeños, son mejores para los agregados duros. Esto es similar, al de los dientes usados para cortar madera o metal en una sierra (los dientes para madera son mucho más grandes que aquellos usados para cortar metal).

La firmeza de incrustación se refiere a la composición de la matriz de metal que sostiene a los cristales de diamante. Ella proporciona soporte a cada diamante (fuerza de adherencia) en un segmento cortante en el borde del disco. Sin embargo, la sujeción de los diamantes debe efectuarse de manera tal que la matriz de metal se desgaste a una velocidad adecuada.

La firmeza de incrustación determina la tasa (velocidad) a que las partículas de diamante, pierden su soporte a medida que el diamante queda mellado o gastado, hasta el punto que ya no es de utilidad, por lo tanto la firmeza de incrustación tiene un efecto directo en la velocidad de corte y vida útil del cabezal.

Los discos mantienen una eficiencia de corte óptima, cuando se elige la resistencia de incrustación adecuada para el agregado del hormigón que está siendo cepillado.

La textura y resistencia al deslizamiento resultante, en una superficie cepillada varía, según el espaciamiento de los discos en el cabezal, lo que a su vez influye en la vida útil y rendimiento del cabezal.

La cantidad de surcos cada 30 cm de pavimento varía entre 50 y 60. Por ejemplo, la alta resistencia al deslizamiento de la textura tipo “cotelé” puede aumentarse en los agregados blandos y de fácil desgaste mediante un mayor espaciamiento entre discos.

Un agregado más duro puede requerir de un espaciamiento menor. La Figura 2.5.13 muestra una textura de cepillado y proporciona recomendaciones para agregados duros y blandos.

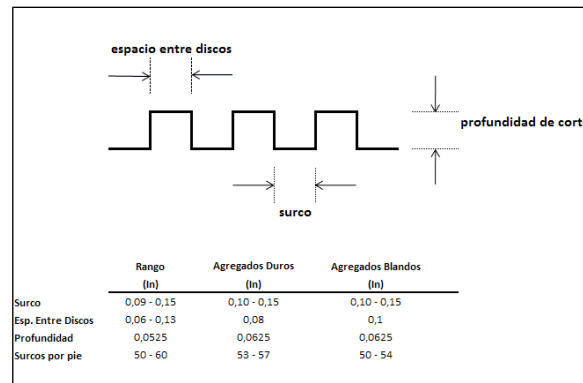


Figura 2.5.13: Dimensiones para la textura del cepillado [Fuente: International Grooving and Grinding Association, 1989.]

No hay que confundir el cepillado, con el fresado o escarificado. El fresado es un proceso de impacto, que saca pequeñas partículas de hormigón de la superficie del pavimento. El fresado en pavimentos de hormigón, causa desconchamiento en las juntas y deja una superficie extremadamente áspera y ruidosa. El cepillado no es de impacto y no daña las juntas. La Figura 2.5.14 muestra la diferencia entre estas técnicas.

El equipo de fresado, causa desmoronamientos excesivos en los bordes, roturas de agregado, desconchamiento en las juntas transversales o longitudinales, y por lo tanto debe preferirse el cepillado.

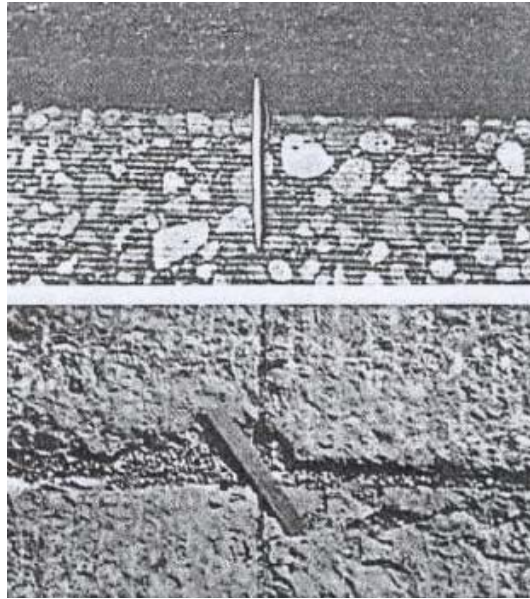


Figura 2.5.14: Diferencia entre cepillado y fresado [Fuente: International Grooving and Grinding Association, 1989.]

Las diferencias entre una superficie fresada y una superficie cepillada, son grandes (cepillado en la parte superior; fresado en la parte inferior). Note que una máquina de fresado puede causar daño a las juntas transversales y longitudinales.

2.5.7. Información sobre el Agregado

La información sobre el agregado y el perfil del pavimento existente, son críticas para la oferta del contratista por cepillado. Tal como se comentó anteriormente, la dureza y la abrasividad tienen gran importancia en la productividad del cepillado.

Los factores que pueden cambiar la productividad del cepillado, haciéndola mayor o menor, independiente de la dureza conocida del agregado es el tamaño máximo de éste y la cantidad de agregado expuesto. Por ejemplo, el agregado grande (de 2 a 3 pulgadas) y de dureza media a mayor, disminuye la productividad del cepillado, si está muy expuesto en la superficie. Por lo tanto, el tamaño del agregado y el nivel de exposición también son factores críticos para las estimaciones de las ofertas.

2.5.8. Situación Normativa

El Manual de Carreteras Volumen N°7 operación 7.305.7 “Cepillado de la superficie”, menciona que el tratamiento deberá afectar como mínimo el 95% de la superficie, la que deberá quedar perfectamente lisa y de apariencia uniforme, por una textura formada por ranuras longitudinales paralelas al borde del pavimento.

Los montes de las corrugaciones serán entre 2,4 y 0,8 mm más altos que los valles, debiendo existir aproximadamente entre 175 y 188 ranuras uniformemente repartidas por metro. El número de ranuras por metro, para producir el efecto antes indicado, dependerá de las características del agregado de los hormigones o de las mezclas

asfálticas y deberá establecerse mediante pruebas. No se recomienda usar ranurados, cuyo espaciamiento impida cumplir con los requisitos exigidos.

2.6. Definición de IRI (Índice de Regularidad Internacional).

El Índice de Rugosidad Internacional (IRI), se define como la acumulación del movimiento vertical, que sufre la suspensión de una rueda (un cuarto de carro) cuando este recorre la superficie a una velocidad de referencia de 80 km/h. En este sentido, es un índice de comodidad de rodadura, y constituye el parámetro de la vía que percibe el usuario.

2.6.1. Modelo Matemático del IRI.

La medición del IRI de un pavimento consiste esencialmente en cuatro pasos:

1. La medición física de un perfil longitudinal simple.
2. Dicho perfil se calcula empleando la media móvil sobre una base de 250 mm de largo. Este cálculo simula el efecto suavizante de la deformación del neumático.
3. El perfil resultante se vuelve a calcular mediante la simulación del cuarto de auto. Esta simulación registra la respuesta física de un auto “ideal” que transita sobre el perfil a una velocidad de 80 km/h.
4. El IRI se calcula como el movimiento acumulado m de la suspensión del auto “ideal”, dividido por la longitud del perfil transitado km . Según Sayers y Karamihas (1996), el modelo matemático se representa en la Figura 2.6.1

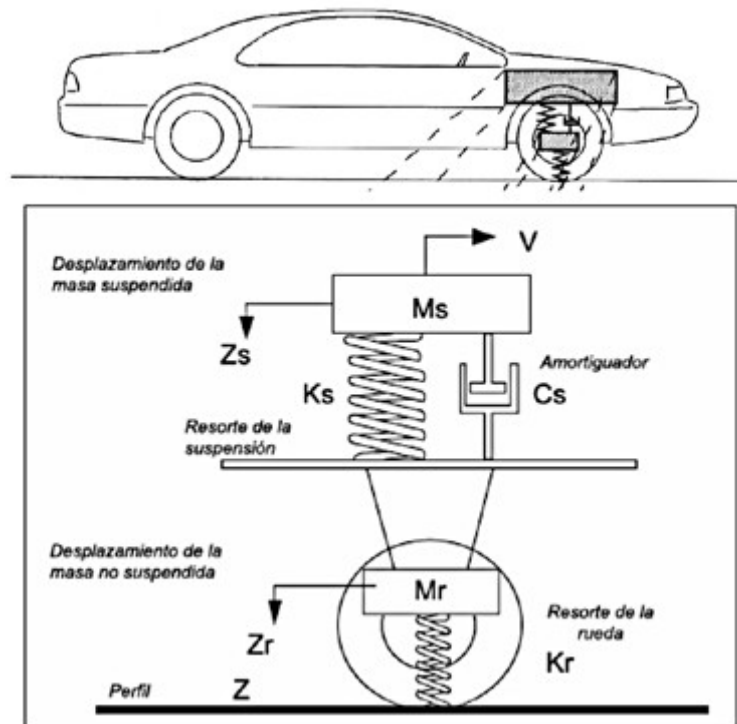


Figura 2.6.1 Representación de masa suspendida y no suspendida en el Modelo del Cuarto de Carro [Fuente: G. Badilla]

Donde:

K_s : Constante del resorte de la suspensión

K_r : Constante del resorte de la rueda

M_s : Masa suspendida

M_r : Masa no suspendida

C_s : Amortiguador

Por lo anterior, el valor del IRI está definido por Ecuación:

$$IRI = \frac{1}{L} \int_0^{X/V} |Z_s - Z_r| dt \quad (2.1)$$

Donde:

IRI es el Índice de Rugosidad Internacional en mm/m; L es la longitud del tramo; X es la distancia longitudinal en m; V es la velocidad del carro modelo 80 km/h; X/V es el tiempo que tarda el modelo en recorrer cierta distancia X ; dt es el incremento de tiempo; Z_s es la velocidad vertical de la masa del vehículo; Z_r es la velocidad vertical de la masa del eje.

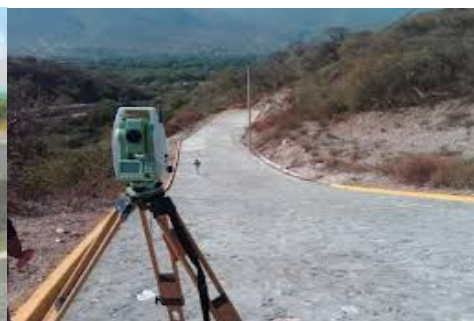
Según (Badilla2005), la regularidad de la superficie de rodadura para la circulación de los vehículos tiene importancia en varios aspectos que se describen a continuación:

- a) Seguridad y comodidad: Una buena regularidad superficial permite ofrecer condiciones de seguridad y comodidad para los usuarios de las vías.

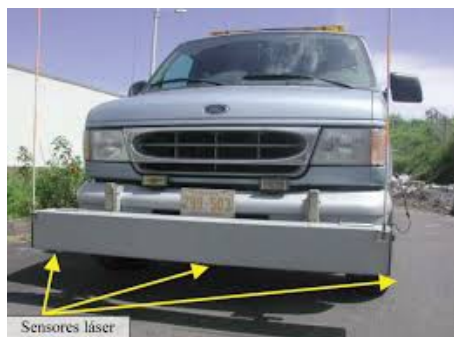
- b) Costos de operación vehicular: Tiene incidencia en los costos de operación de los vehículos, puesto que, dependiendo de la magnitud de las irregularidades superficiales, la velocidad de circulación puede verse afectada negativamente, lo cual puede reflejarse por un mayor desgaste en llantas y componentes mecánicos de los vehículos y mayor consumo de combustible.
- c) Efectos dinámicos: Los efectos dinámicos producidos por las irregularidades de las vías, pueden reflejarse no solo en los vehículos, sino también en modificaciones de estado de esfuerzos y deformaciones en la estructura del pavimento, lo que puede incrementar los costos en las actividades de conservación (mantenimiento, rehabilitación o reconstrucción).
- d) Acciones de conservación de las vías: La rugosidad inicial de los pavimentos es un indicador de la calidad de la construcción de las vías. Si el pavimento es construido con buena regularidad superficial se espera que su vida útil sea mayor que otro que tenga mayores deformaciones; sin embargo, debe tenerse en cuenta que el progreso de las irregularidades depende de muchos otros factores como las cargas impuestas por el tráfico, el clima, la variabilidad de los materiales de construcción, el estado de la subrasante, variaciones de topografía, presencia de estructuras en la vía, entre otros aspectos, por lo tanto es de suma importancia conocer la regularidad superficial del pavimento en cualquier momento desde el inicio de su periodo de servicio o de la vida útil, para definir las acciones de conservación (mantenimiento, rehabilitación o reconstrucción) necesarias en el momento pertinente.



Merlín



Nivel Topográfico



Sensores láser

Perfilometro Laser



Equipo Tipo Respuesta

Figura 2.6.2: Equipos para medición de IRI [Fuente: El Autor, 2012.]

Capítulo 3

Implementación de la solución

3.1 Introducción

La división Andina opera el yacimiento Río Blanco, cuya riqueza era conocida desde 1920. Pero los intentos por iniciar su explotación no se concretaron hasta medio siglo después, en 1970.

Durante esta época de comienzos de la explotación, las pistas se construían básicamente de material estabilizado, el que requería de una constante mantención ya que debido a los procesos de extracción sufrían grandes deterioros, principalmente por los baldes de los *LHD*.

En la actualidad se ha avanzado enormemente en la confección de las pistas en el interior mina, gracias a la técnica del hormigonado, pero no se le ha dado la importancia necesaria al mantenimiento de las pistas, ya que luego de su construcción son ocupadas hasta que se transforman en superficies intransitables, este problema le genera enormes pérdidas a Codelco División Andina, debido a la baja en los rendimientos y los costos de mantención y contratación de operadores debido a las jornadas más reducidas del operario debido al mínimo confort que las pistas entregan.

3.2 Los pavimentos en mina subterránea Codelco División Andina

Codelco División Andina cuenta con aproximadamente 20 kilómetros de pistas hormigonadas entre los niveles 16 y 17, la forma abovedada de los túneles los hace muy complejos para la realización de todo tipo de trabajo, debido a lo estrecho de las galerías, pero esto no ha sido impedimento para poder llegar a los actuales estándares de las pistas las cuales permiten un traslado de manera expedita y segura. Luego de los primeros 9 meses de contruidos comienzan a presentar serios daños ocasionando una serie de problemas.

Actualmente los pavimentos ya contruidos, se confeccionan considerando un hormigón base H-50 MPa, el cual es colocado directamente en la roca luego de la explotación, debido a lo irregular de la superficie el espesor promedio de los pavimentos es de 40 cm.

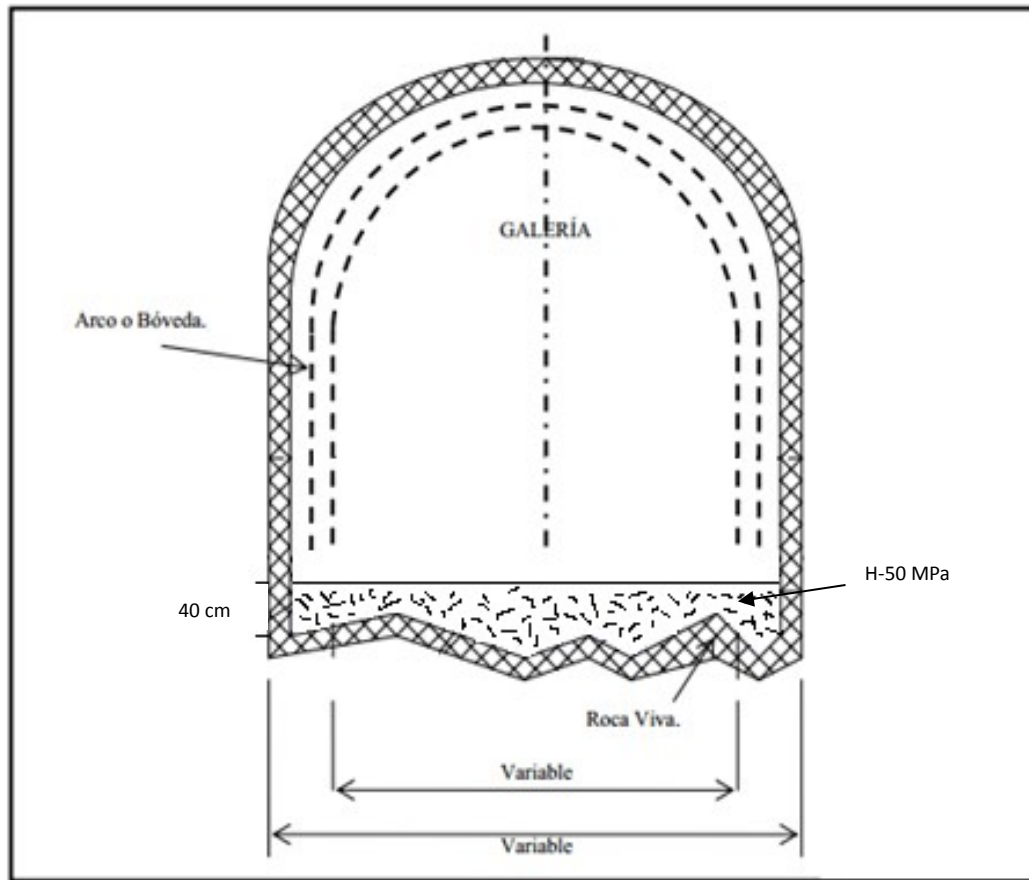


Figura 3.2.1: Galería confeccionada con hormigón H-50 MPa espesor 40 cm [Fuente: Elaboración propia, 2013.]

Los pavimentos en el nivel 17, dependiendo de los tipos de equipos que transiten por ellos, tienen una duración de 9 a 12 meses de manera aceptable, después de este periodo, comienzan a presentar serios problemas de escalonamiento, ondulaciones, punzonamiento y superficies con poca adherencia a los neumáticos.

Los daños antes mencionados son producto del peso de los equipos y del material que cae y que es pisado por las tolvas, además en el nivel 16 donde trabajan los equipos *LHD* se producen deterioros producto del arrastre de los baldes durante el proceso de vaciado del material en los buzones de carga y el punzonamiento y desgaste del hormigón, generado al pisar material y patinado de los neumáticos durante el proceso de empuje para el llenado del balde.

Estos deterioros son reparados cuando se producen disminución en los rendimientos y observaciones por parte de los operadores ya que debido a las características de los equipos sus sistemas de suspensión no están diseñados para el confort de los operadores sino para que resistan las condiciones existentes en el interior de la mina.

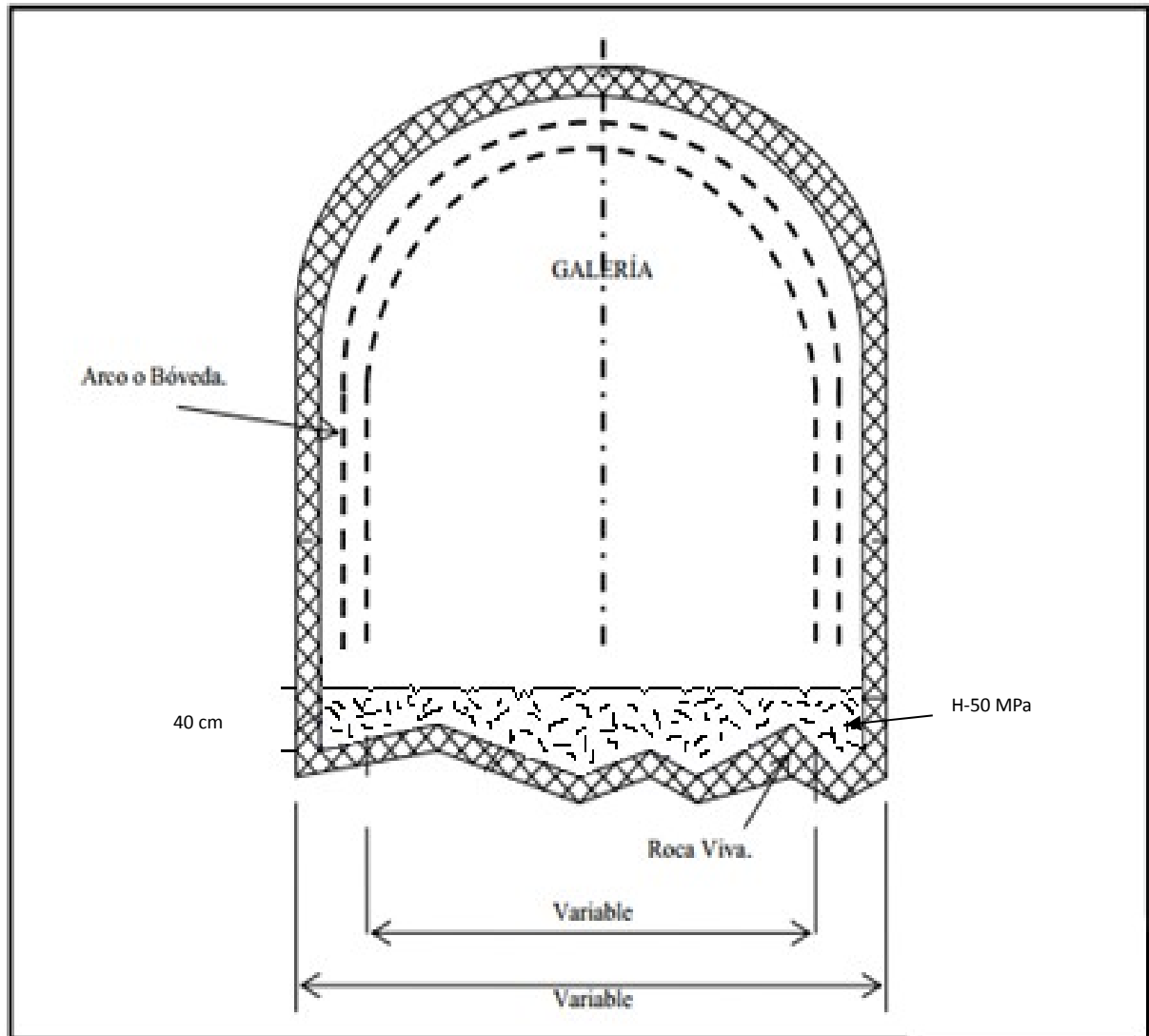


Figura 3.2.2: Deterioro producido por el tránsito de los equipos. [Fuente: Elaboración Propia, 2013.]

Luego del diagnostico por parte del administrador de pistas de Codelco, se procede a la reparación de los sectores que presenten mayor deterioro, esta reparación consiste en la remoción de 15 cm aproximadamente del hormigón H-50 MPa, el cual es fresado o picado con martillos demoledores neumáticos esto dependiendo de la longitud de pavimento que será reparado.

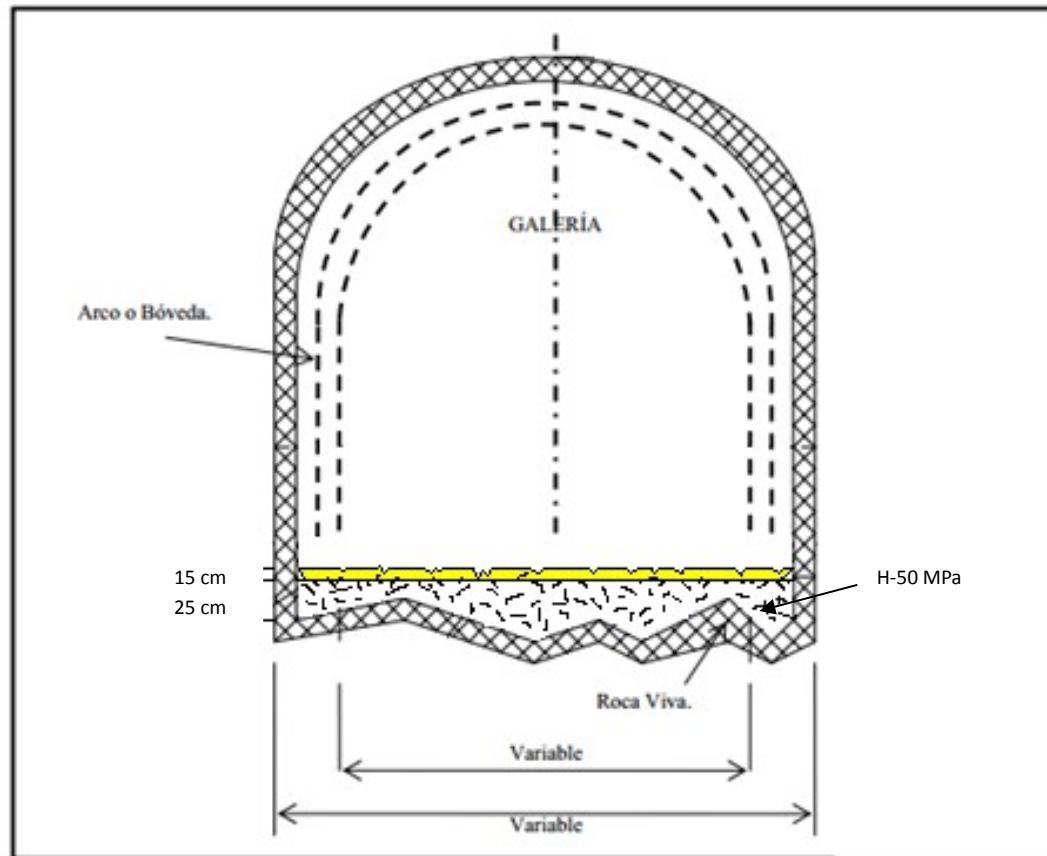


Figura 3.2.3: Espesor de 15[cm.] a ser reparado [Fuente: Elaboración propia, 2013]

Para realizar esta reparación, se coloca un puente adherente del tipo epóxico, para una mejor fijación entre el antiguo hormigón (H-50) y el nuevo que en este caso corresponde a un hormigón H-80 MPa que es colocado para minimizar los problemas de escalonamiento y descensos que se producen ya que el hormigón H-50 MPa, no es capaz de resistir las solicitaciones que en la actualidad generan los equipos, luego de la colocación del H-80 MPa se confecciona un mortero T-100 MPa, reforzado con fibras de acero de 2,5 cm de espesor, esta capa es colocada con la técnica de fresco sobre fresco la que consiste en dar un margen de 2 horas entre la colocación del H-80 MPa y el T-100 MPa, para producir una adherencia entre ambos, la gran ventaja del T-100 MPa es que le da gran resistencia y flexibilidad, esto debido que no se deben hacer cortes para contracción propia del mortero, proporcionando una superficie continua y evitando así el escalonamiento.

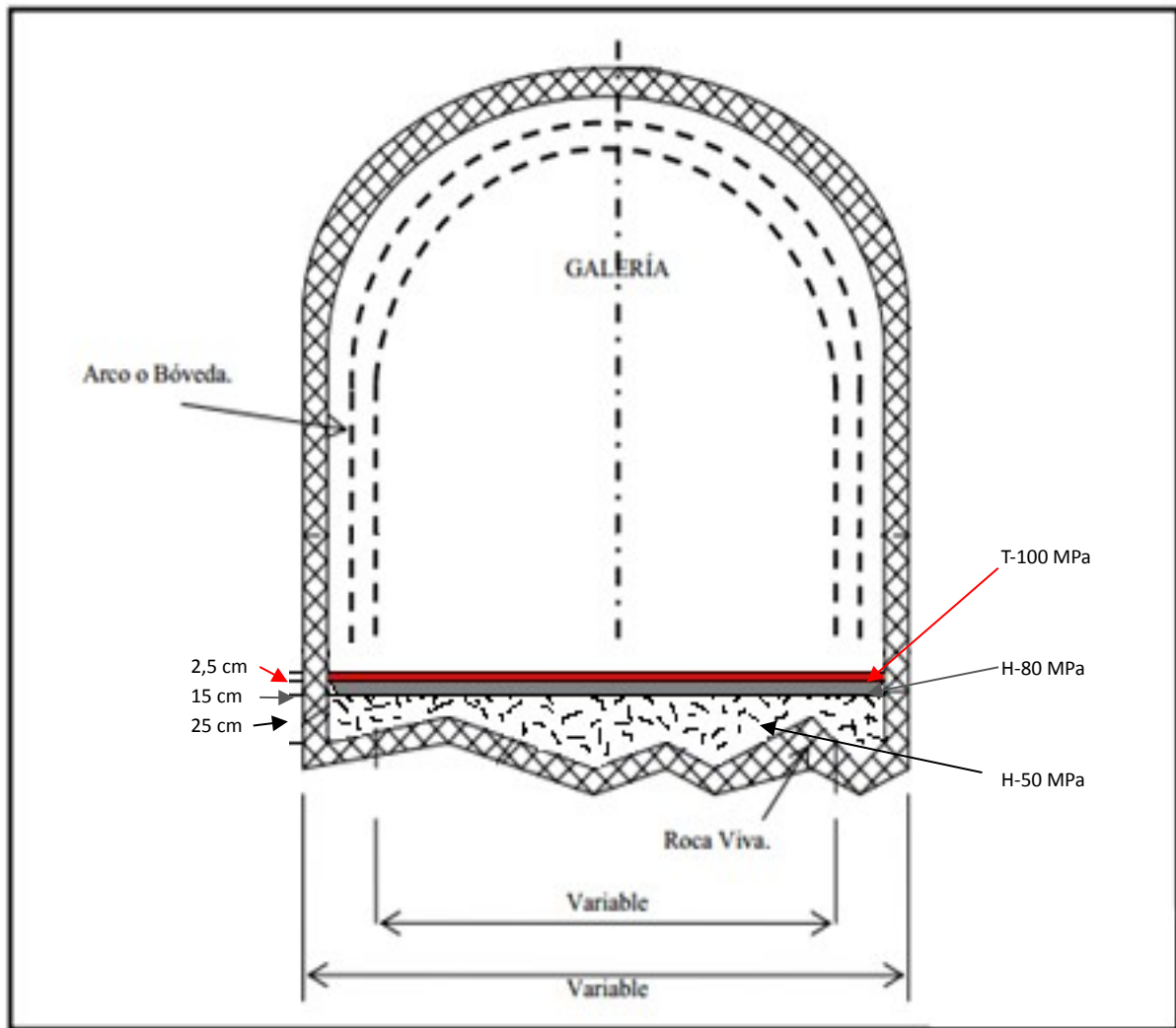


Figura 3.2.4: Colocación de hormigón H-80 MPa y T100 MPa [Elaboración propia, 2013.]

Este tipo de reparación Figura N° 3.2.4, es la que presenta daños en estos momentos y es el problema que Codelco requiere solución debido a la baja en los rendimientos y al aumento en los costos de mantención de los equipos.

3.3 Condiciones existentes en Mina Subterránea.

Como se ha mencionado anteriormente las condiciones de trabajo en la minería subterránea, para el caso particular de la confección de hormigones para pistas son muy adversas, a continuación se mencionaran las actuales condiciones de trabajo que se presentan en Codelco División Andina.

- 1) Espacios reducidos: Las galerías de una mina subterránea son de forma abovedada y sus dimensiones responden a los métodos de extracción y tipo de

equipo utilizado, por esta razón, el espacio disponible en la mina, no es el más adecuado para realizar obras de pavimentación con equipos tradicionales.

- 2) Tiempo de construcción limitado (sectores en producción): La ejecución de las obras de hormigonado interrumpen las faenas propias de la mina, lo cual tiene un costo asociado a la pérdida de eficiencia en la producción, por eso, el tiempo de postura del hormigón debe ser el menor posible.
- 3) Falta de iluminación natural: Por tratarse de una mina subterránea, la ejecución de las posturas de hormigón, deben llevarse a cabo con el auxilio de luz artificial, lo cual también introducen dificultades a los trabajos de construcción.



Figura 3.3.1: Falta de iluminación en mina subterránea [Fuente: El Autor, 2012]

- 4) Superficie Irregular: Luego de la extracción del mineral la superficie que resultante es tan irregular que se hace imposible colocar alguna guía para poder darle la lisura optima a los pavimentos.



Figura 3.3.2: Superficie irregular en mina subterránea [Fuente: El Autor, 2012]

- 5) Acumulación de Aguas: Debido a las múltiples vertientes que atraviesan las rocas y durante la extracción del mineral su cauce natural es destruido estas se comienzan a acumular en las galerías.



Figura 3.3.3: Acumulación de Agua en galerías mina subterránea [Fuente: El Autor, 2012]

Debido a esto, es que Codelco dentro de su continuo interés por mejorar su sistema productivo, está buscando una solución al problema de la baja duración de las pistas de producción y transporte en los niveles 16 y 17, el principal problema, que se encontró fue que no se contaba con datos en cuanto a medición de IRI por parte de Codelco.

En la actualidad no existe una regulación con respecto al índice de regularidad internacional, en los caminos privados solamente existe la exigencia del MOP a los caminos públicos, donde la exigencia depende al tipo de camino como se menciona en la tabla siguiente.

Tabla3.3.1: Exigencia IRI

Tipo de Pavimento	IRI exigido m/Km.
Hormigón	IRI ≤ 2.0
Asfalto	IRI ≤ 2.0
Tratamiento superficial	IRI ≤ 3.0

Fuente: Elaboración propia, 2013.

3.4 Mediciones

Para poder realizar las determinaciones de la rugosidad de las pistas de rodado en los niveles 17 de Transporte y 16 producción LHD, se tuvo que recurrir a empresas dedicadas a hacer controles de este tipo en el mercado, se encontraron dos empresas que se dedican hacer este tipo de auscultaciones en terreno tales como **APSA** la cual se dedica a la gestión de infraestructura de carreteras Nacionales e Internacionales y **CESMEC S.A.** (División medio ambiente) es una organización privada e independiente dedicada a la prestación de Servicios de Ingeniería, relacionados con certificación de productos.

Estas dos empresas brindaron servicios los cuales fueron los siguientes; **APSA** fue encargada en hacer las mediciones del IRI (índice regularidad internacional) en calles de producción en mina subterránea tanto de los niveles 17 y 16 LHD **CESMEC S.A.** realizó mediciones de aceleración vibratoria sobre el Cuerpo Entero de los operadores de los equipos, en diversos puntos al interior de calles de Producción LHD y Transporte en la mina subterránea

3.4.1 IRI (Índice regularidad internacional)

Ha sido un parámetro ampliamente utilizado, para determinar las características superficiales que presentan los pavimentos de carreteras en Chile, se ha venido introduciendo la medición del IRI como parámetro de aceptación de diferentes obras viales, para así determinar el grado de rugosidad de estas. Como objetivo principal se debe determinar el estado de pavimentos existentes en los niveles 16 y 17 en mina subterránea, este trabajo persigue generar mejoras en la gestión de los pavimentos de hormigón al interior de la mina, debido al alto impacto que ellos registran sobre la producción.

Es fundamental para la evolución de la regularidad en un pavimento nuevo, determinar el umbral inicial, que se debe cumplir previo a la puesta en marcha. Especificar un IRI inicial y realizar las acciones para cumplirlo, son tareas fundamentales para la evolución de este indicador en el tiempo.

La ausencia de estudios y especificaciones de índice de regularidad, para pavimentos al interior de minas subterráneas y de lo particular de estos, sus tipos de tránsito y agentes externos, que influyen en el comportamiento del pavimento , nos lleva a proponer una metodología de terminación del umbral inicial de IRI, basado en las mediciones directas o el cálculo teórico sobre un tramo de control en el cual se tendrá especial cuidado en utilizar las técnicas constructivas habituales debidamente controladas.

Se determina el IRI con el cual queda construido un tramo nuevo, para definir este valor como un umbral inicial, para el cual realizar las mediciones y evaluaciones posteriores,

como así también recomendar que sea este valor esperable al momento de entregar un tramo nuevo al servicio.

3.4.2 Actividades en terreno

Para realizar la medición del IRI en el interior de la mina, se requieren los siguientes recursos los cuales se dividen en Equipos y mano de obra. La gran ventaja de estos equipos, que no se ven afectados por las condiciones adversas y extremas del interior de la mina donde existe presencia de agua, polvo y áridos sueltos.

Cuadro 3.4.1: Equipos y mano de Obra Utilizada.

Equipo	Cantidad
Camioneta D/C	1
Bump Integrator	1
Rugometro III	1
Mano de Obra	Cantidad
Operador Camioneta	1
Especialistas	1

Fuente: Elaboración propia, 2013.



Figura 3.4.1: Equipos para medición de IRI [Fuente: Apsa, 2012.]

3.4.3 Secuencia de trabajo

Entre las fechas 18 de junio y 07 de Diciembre 2012, se comienza con campaña de tomar irregularidades de pista de producción en mina subterránea, tanto para los niveles 17 de transporte y 16 LHD. Para realizar los trabajos, en los días de cada campaña de toma de datos en terreno, se debe realizar los siguientes procesos en cada uno de los dos niveles a Auscultar.

3.4.3.1 En Nivel 17 de la siguiente forma:

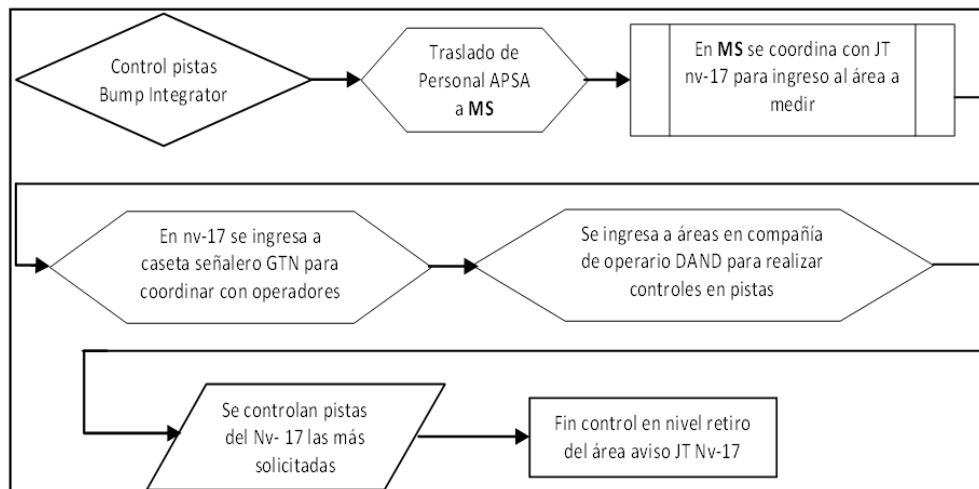


Figura 3.4.2: Proceso de auscultación Nivel 17 [Fuente: Elaboración Propia, 2012]

3.4.3.2 En Nivel 16 de la siguiente forma:

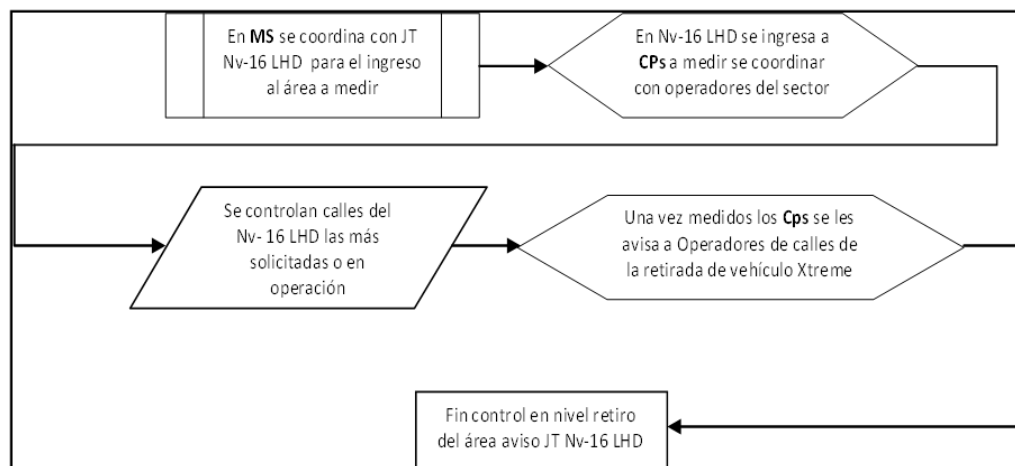


Figura 3.4.3: Proceso de auscultación Nivel 16 [Fuente: Elaboración Propia, 2012]

Luego del proceso de auscultación, los datos tomados en terreno son procesados en sistemas computacionales, los cuales entregaran datos numéricos y gráficos de los sectores donde auscultados.

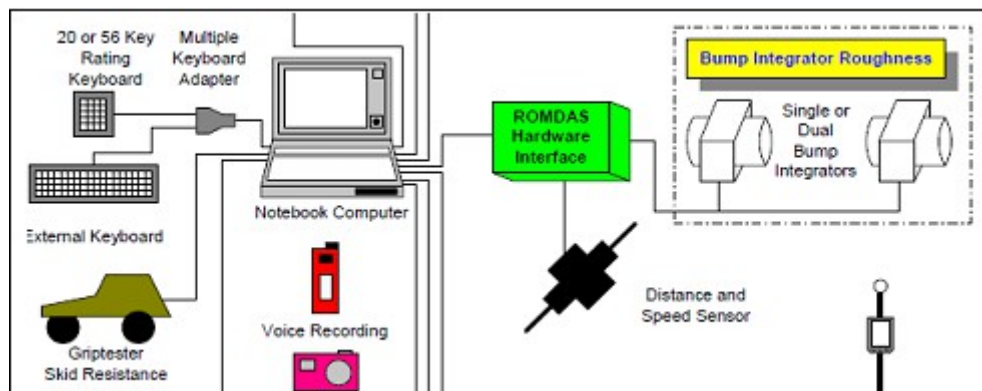


Figura 3.4.4: Procesamiento de datos en sistema computacional [Fuente:Apsa, 2012]

3.4.4 Medición de IRI en pavimentos nuevos Nivel 17.

Las primeras mediciones que se realizaron fueron a los pavimentos nuevos, estas mediciones tienen como propósito determinar el IRI con que quedan contruidos las pavimentos, dadas las condiciones al interior de la mina, estos datos son de gran importancia debido a que pueden proporcionar parámetros a exigir en los futuros pavimentos y al IRI que se debe lograr con el cepillado de las pavimentos antiguos.

1) Fecha: 20.06.12

Cuadro3.4.2: Medición de IRI Pavimentos nuevos nivel 17

Distancia	Velocidad	Bump. 20.06.12	IRI 20.06.12
30	18,547	50	5,8121
40	20,675	46	5,6989
50	21,432	48	5,7107
60	19,764	46	5,7953
70	20,659	48	5,7107
80	21,065	51	5,8346
90	19,761	46	5,7561
Promedio			5,75977

Fuente: Apsa, 2012

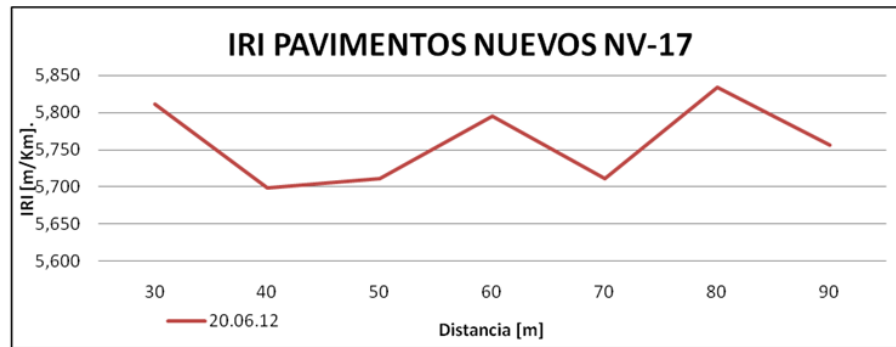


Figura 3.4.5: Grafico medición de IRI pavimentos nuevos nivel 17 [Fuente: Apsa, 2012]

Figura 3.4.5: Grafico medición de IRI pavimentos nuevos nivel 17 [Fuente: Apsa, 2012]

3.4.4.1 Resultados entregados.

La tabla 3.4.2 nos indica, que dada las condiciones existentes en el interior de la mina subterránea y construyendo de acuerdo a los estándares de calidad exigidos por Codelco, el IRI inicial corresponde a un IRI de 5,75 m/km este valor será el que tomaremos como optimo para exigir en el cepillado de los pavimentos antiguos en el nivel 17.

3.4.5 Medición de IRI pavimentos antiguos Nivel 17.

Los pavimentos antiguos del nivel 17, actualmente están reparados con una capa de hormigón T-100 MPa de 2,5 cm de espesor, el cual corresponde a un hormigón reforzado con fibras de acero, la medición del IRI en estos pavimentos, nos permitirá dimensionar el daño que ha sufrido la carpeta al compararlo con la medición de los pavimentos nuevos.

2) 20.06.12

Tabla 3.4.3: Medición de IRI pavimentos antiguos nivel 17

Distancia	Velocidad	Bump. 20.06.12	IRI 20.06.12
30	18,3211	64	7,6143
40	19,42857	47	6,0979
50	19,25538	45	5,9195
60	20,5049	59	7,1683
70	21,7664	64	7,6143
80	20,2935	74	8,5063
90	21,5492	56	6,9007
Promedio			7,11733

Fuente: Apsa, 2012

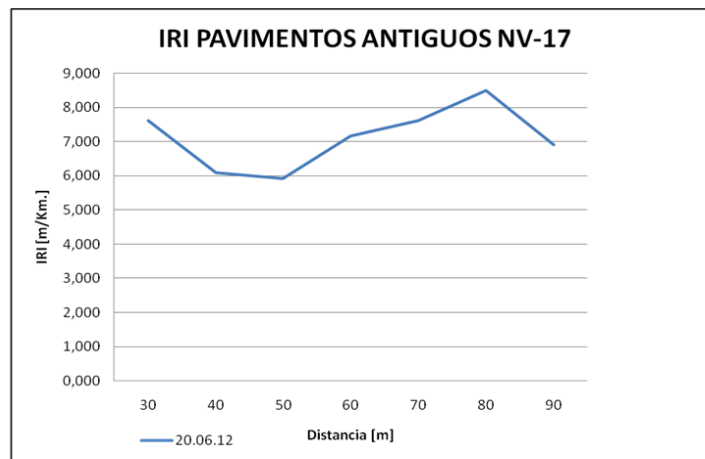


Figura 3.4.6: Gráfico medición de IRI pavimentos nuevos nivel 17 [Fuente: Apsa, 2012]

Figura 3.4.6: Gráfico medición de IRI pavimentos nuevos nivel 17 [Fuente: Apsa, 2012]

3.4.5.1 Resultados Entregados

En la tabla 3.4.3 muestra los datos que se recaudan en terreno, en este caso muestra el IRI del **Xc-55 entre K13 al M13** en los cuales fueron catastrado aproximadamente 90 m lineales, en los cuales el equipo de medición arrojó que en ese tramo existe un IRI de 7.1 m/km, lo que quiere decir que cada 1 metro existe una diferencia de 7.1 cm Σ arriba o hacia abajo desde un umbral 0,0.

3.4.6 Medición de IRI actual pavimentos antiguo tramo prueba cepillado Nivel 17.

Estas mediciones se realizaron en el Xc-80 entre Socavón central y Xc-132 la que consistió en realizar mediciones antes de realizar los cepillado para poder visualizar las mejoras en el IRI durante cada cepillado realizado.

3) 20.06.12

Tabla 3.4.4: Medición de IRI pavimentos antiguos tramo de prueba nivel 17

Distancia	Velocidad	Bump. 20.06.12	IRI 20.06.12
10	19,351	99	11,792
20	20,476	66	7,803
30	19,732	54	6,462
40	21,943	81	9,621
50	20,534	65	7,734
60	19,875	63	7,452
70	19,995	53	6,321
80	21,456	84	9,973
90	20,786	84	9,940
Promedio			8,566

Fuente: Apsa, 2012

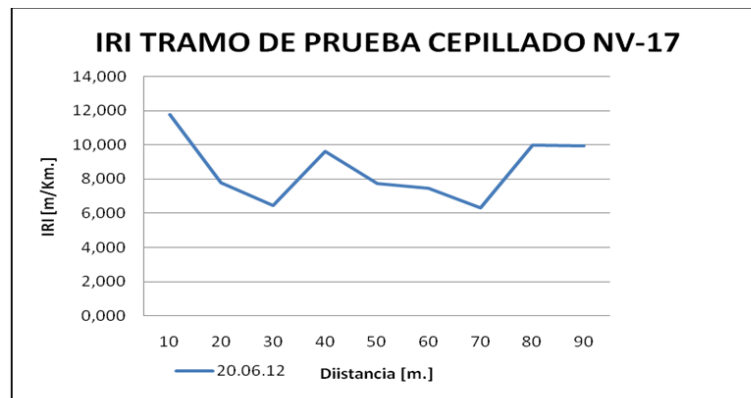


Figura 3.4.7: Gráfico medición de IRI pavimentos antiguos tramo de prueba nivel 17 [Fuente: Apsa, 2012]

Figura 3.4.7: Gráfico medición de IRI pavimentos antiguos tramo de prueba nivel 17 [Fuente: Apsa, 2012]

Como se puede apreciar en la tabla 3.4.4, en el tramo de prueba que será cepillado, inicialmente presenta un IRI de 8,56 m/km, este tramo es el que se requiere cepillar y dejarlo con un IRI 5,7 m/km, que es el valor que se obtuvo de la medición de los pavimentos nuevos y el cual se obtiene luego de su construcción.

3.5 Aceleración Vibratoria.

Además de las mediciones de IRI, se realizaron pruebas de aceleración vibratoria para medir las condiciones a las que están expuestos los operadores durante el desplazamiento por las pistas, estas pruebas son realizadas tanto en los niveles 17 y 16 como en las nuevas calles hormigonadas, llamadas *Gardilcic*, para estas pruebas se contrataron los servicios de Cesmec, ya que eran los que tenían los equipos adecuados para este tipo de mediciones.

3.5.1 Proveedor Cesmec S.A

Con el objeto de comparar, se definen en función de puntos referenciales que permitirán realizar comparaciones entre los valores de aceleración y las rugosidades de las pistas de rodado en mina subterránea, por ende, seguir la evolución de la calidad de la pista en el tiempo. Para ello se realizan mediciones de aceleración vibratoria para Cuerpo Entero, de acuerdo a los parámetros y procedimientos establecidos, se toma las vibraciones en las pista, para esto la Empresa CESMEC S.A. entregara una evaluación de la calidad de las calles en el área de Transporte nivel 17 y en el nivel 16 *LHD* con el fin de establecer ciertos parámetros de calidad del pavimento y de su evolución en el tiempo.

3.5.2 Objetivo Vibración

Como Objetivo General, se quiere determinar las condiciones de calidad de las calles en la mina subterránea, mediante la medición de aceleración vibratoria, transmitida desde el vehículo de prueba hacia la columna vertebral. Para cumplir el objetivo General, se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- Obtener valores representativos de las aceleraciones, que se generan por la operación del vehículo de prueba, asociadas a los perfiles de las calles.
- Obtener las curvas segundo a segundo de las aceleraciones en los 3 ejes ortogonales de las mediciones en las calles elegidas.
- Comparar los niveles de ruido, con los límites máximos permitidos por el Decreto Supremo N° 594 del Ministerio de Salud.

3.5.3 Normativa.

Se efectuaron mediciones de las vibraciones transmitidas al trabajador, a través del asiento del equipo hacia la espina dorsal, evaluándose la aceleración vibratoria transmitida hacia la espina dorsal en los ejes x, (hacia delante y atrás) y, (hacia la derecha e izquierda) y z, (hacia arriba y abajo). Para el eje z se usó la curva de ponderación W_k y para los ejes x e y se usó la curva W_d , de acuerdo a los requisitos del Instructivo de Aplicación del DS 594 del ISP.

Tabla 3.5.1 Ponderaciones de frecuencia.

Ponderaciones	Condición de aplicación
Wh	Exposición de Mano-Brazo, ejes Z, X e Y.
Wk	Exposición de Cuerpo Entero, vertical o posición sentado, eje Z.
Wd	Exposición de Cuerpo Entero, horizontal o posición sentado, ejes X e Y
Wc	Exposición de Cuerpo Entero, posición sentado, eje X, transductor ubicado en zona dorsal.

Fuente: D.S. N° 594/99 del Ministerio de Salud, 2000

Tabla 3.5.1 Tiempos de exposición máximos

Además la tabla 3.5.1, permitirá evaluar de acuerdo a las mediciones tomadas (aceleraciones equivalentes en los ejes X,Y,Z), determinar los tiempos máximos de exposición a los que los operadores pueden soportar.

Tabla 3.5.2 Tiempos de exposición máximos

Tiempo de exposición (horas)	Aeq Máxima Permitida		
	Z	X	Y
12	0,5	0,35	0,35
11	0,53	0,38	0,38
10	0,56	0,39	0,39
9	0,59	0,42	0,42
8	0,63	0,45	0,45
7	0,7	0,5	0,5
6	0,78	0,54	0,54
5	0,9	0,61	0,61
4	1,06	0,71	0,71
3	1,27	0,88	0,88
2	1,61	1,25	1,25
1	2,36	1,7	1,7
0,5	3,3	2,31	2,31

Fuente: D.S. N° 594/99 del Ministerio de Salud, 2000

Para lograr dicha evaluación se coloca el sensor de vibraciones triaxiales en el asiento del equipo, donde se sienta el trabajador y, en algunos casos, en el piso del equipo, donde se pone de pie el trabajador.

La figura 3.5.1, muestra un ejemplo de la forma en que se coloca el pad o sensor triaxial, para la obtención de la aceleración vibratoria en los ejes señalados.

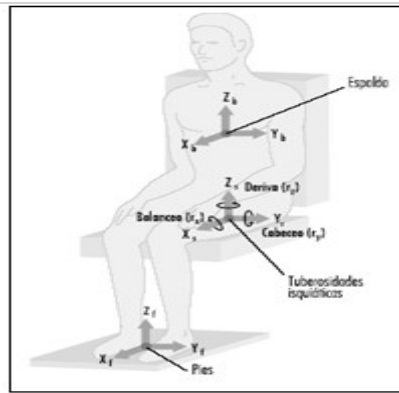


Figura 3.5.1: Forma de colocación sensor triaxial [Fuente: Cesmec S.A, 2012.]

Algunos niveles de ruido equivalente, (L_{eq}) y los tiempos máximos de exposición permitidos para ruido Estable o Fluctuante:

A continuación se presentan los criterios de evaluación usados

Aceleración vibratoria (m/s^2)	A_{eqx}	A_{eqy}	A_{eqz}	A_{eqTP}
	0,35	0,35	0,5	0,63

Figura 3.5.2: Criterio de evaluación para aceleración vibratoria [Fuente: Cesmec S.A, 2012]

3.5.4 Procedimiento

Se calibra el equipamiento a utilizar, certificando su uso apropiado.

Se miden los Niveles de Presión Sonora (NPS) con unidad en decibeles y curva de ponderación “A”, [dB(A)], repuesta Lenta y nocturna, durante la cual, las fuentes de ruido involucradas se encontraban en operación normal.

Las mediciones en los puntos receptores en las áreas internas, corresponden a un promedio aritmético de 3 mediciones registradas durante un periodo de 5 minutos cada una, y fueron realizadas en jornada de día hábil diurna, durante la cual las fuentes de ruido involucradas se encontraban en operación normal.

El instrumento de medición, en cada uno de los puntos, se ubicó a 1,5 m de su eje vertical (piso) y a no menos de 3.5 m de cualquier superficie reflectante en su eje horizontal (paredes, muros, ventanas).

Se usó un medidor de vibraciones marca *QUEST* modelo *HAVPro*, (certificado de calibración 106859904068 HAVPRO), el cual recibe las señales del sensor para procesarlas, obteniéndose los valores de aceleración equivalente, para los tres ejes

coordinados, las aceleraciones máxima, mínima, *peak*, entre otros datos importantes para el análisis.

Se analiza el comportamiento de las vibraciones en los ejes x: movimientos hacia adelante y atrás: eje y: movimientos laterales y en el eje z: movimientos verticales o “saltos”.



Figura 3.5.3: Equipo para medición de vibraciones [Fuente: Cesium S.A, 2012]

Para realizar esta campaña se debieron tener los siguientes recursos:

Tabla 3.5.3: Recursos utilizados para medición de vibraciones.

CAMIONETA D/C	01
MEDIDOR VIBRACIONES QUEST HAVPro	01
OPERADOR CAMIONETA	01
ESPECIALISTA	01

Fuente: Elaboración propia, 2013

3.5.5 Resultados entregados

Entre las fechas 07 y 23 de Diciembre 2012 se realizaron, las campañas de medición de vibraciones en mina subterránea, por lo cual se entregan los siguientes resultados para los dos niveles que se controlaron en las fechas ya señaladas:

Se consideraron mediciones en lapsos de tiempo requerido para hacer los recorridos por las calles a velocidades medias – bajas tramos de 5 minutos, los que son

representativos de los ciclos de trabajo. Las siguientes figuras muestran los resultados obtenidos en sectores de los niveles 17 y 16 y Gardilcic.

3.5.5.1 Nivel 17 Transporte: Campaña n°01 07 de Diciembre 2012

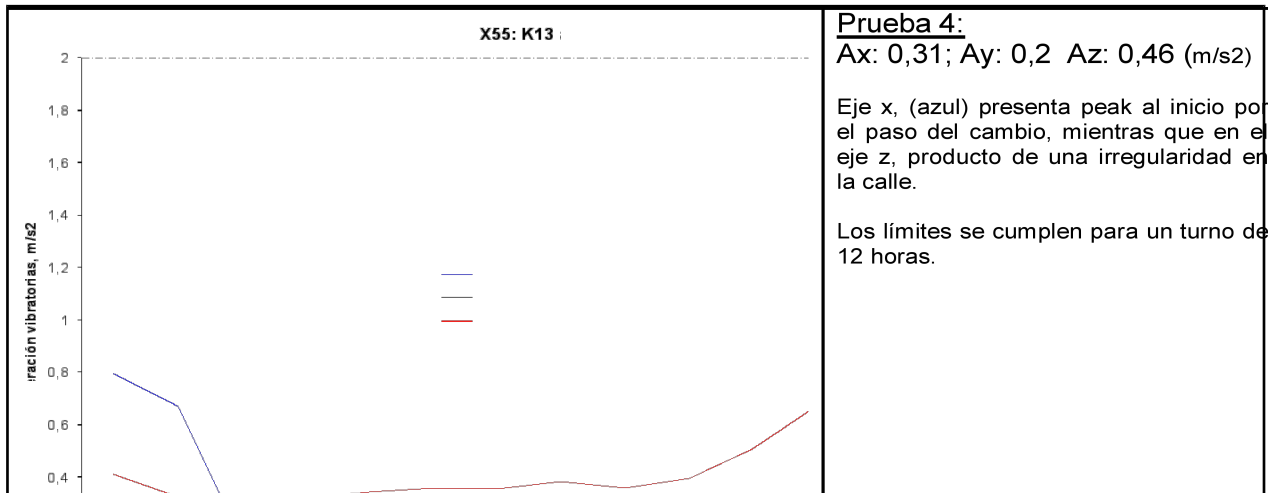


Figura 3.5.4: Gráfico aceleración vibratoria nivel 17 [Fuente: Cesmec S.A, 2012]

3.5.5.2 Nivel 17 Transporte: Campaña n°02 23 de Diciembre 2012

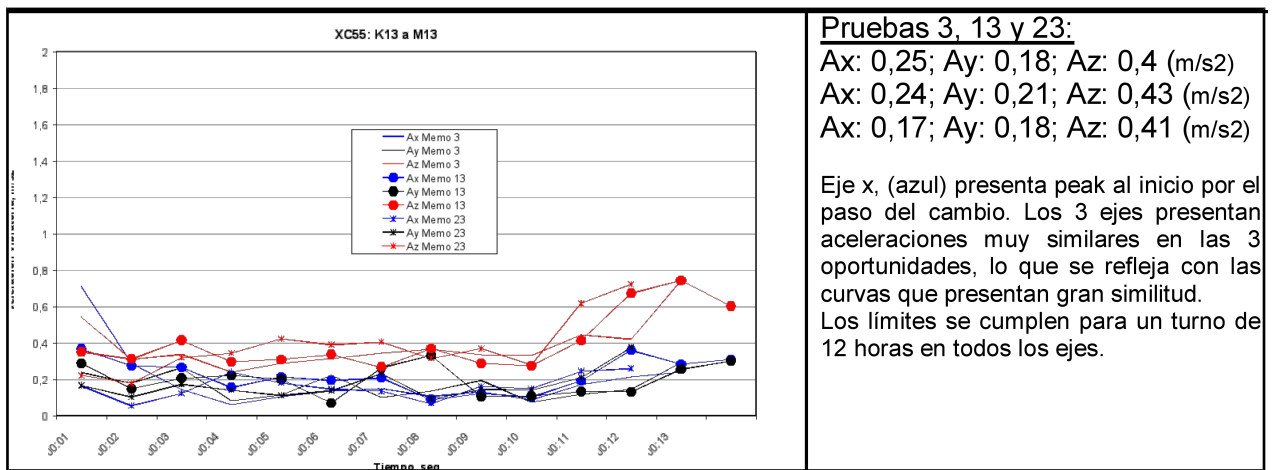


Figura 3.5.5: Gráfico aceleración vibratoria nivel 17 [Fuente: Cesmec S.A, 2012]

3.5.5.3 Nivel 16, *LHD* Producción: Campaña N°1 07 de Diciembre 2012

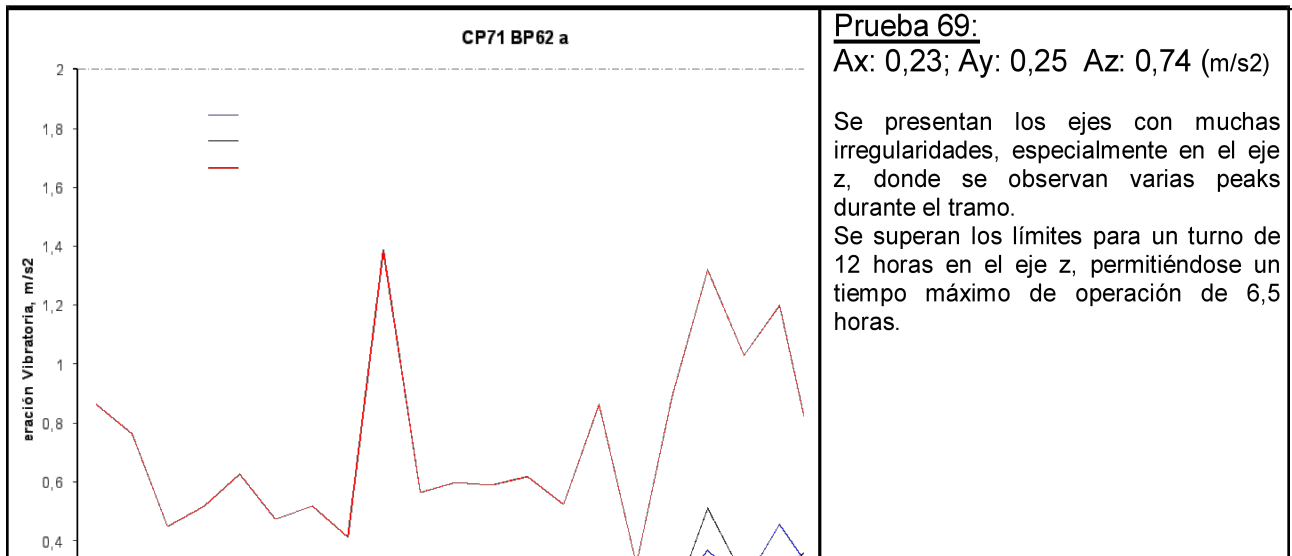


Figura 3.5.6: Gráfico aceleración vibratoria nivel 16 [Fuente: Cesmec S.A, 2012]

3.5.5.4 Nivel 16, *LHD* Producción: Campaña n°02 23 de Diciembre 2012

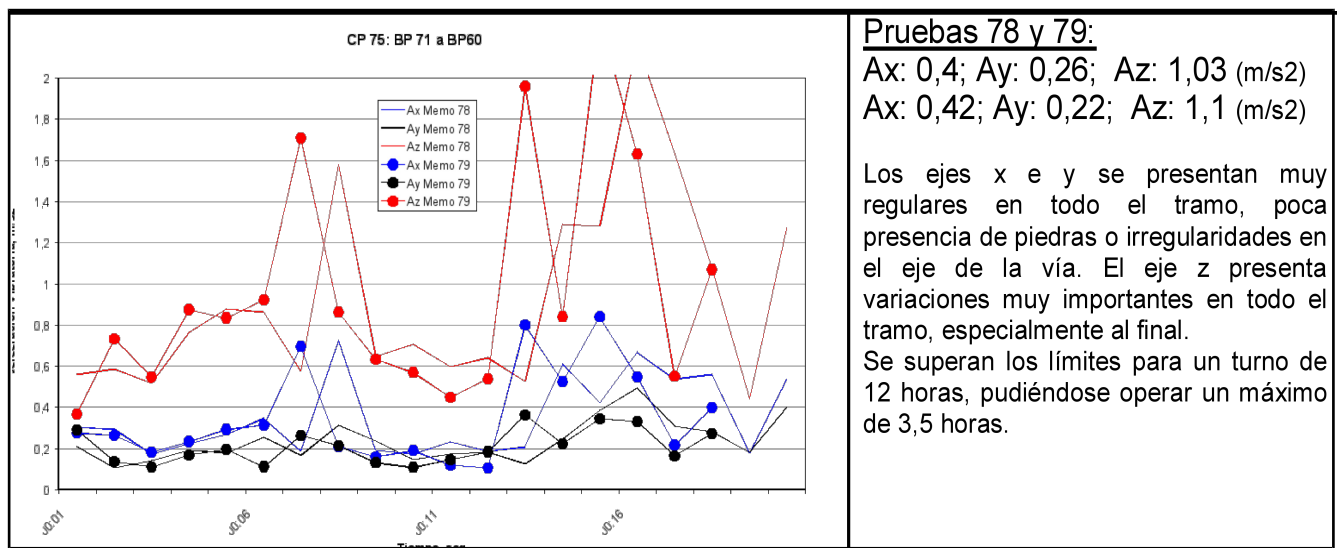


Figura 3.5.7: Gráfico aceleración vibratoria nivel 16 [Fuente: Cesmec S.A, 2012]

3.5.5.5 Calles Nuevas Gardilcic Campaña n°01 07 de Diciembre 2012

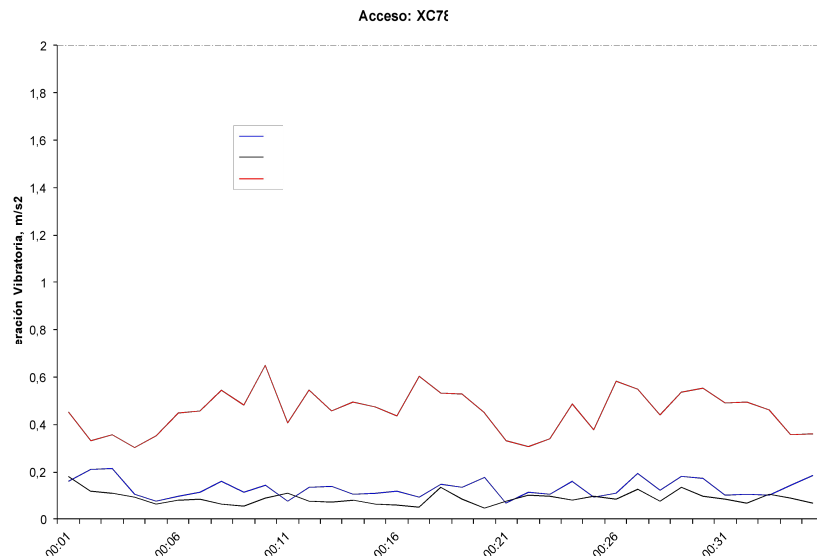


Figura 3.5.8: Gráfico aceleración vibratoria calles nuevas Gardilcic [Fuente: Cesmec S.A, 2012]

Prueba 59:

Ax: 0,14; Ay: 0,1 Az: 0,46 (m/s²)

Se presentan los ejes muy estables en los ejes x e y, mientras que en el eje z se observan diversas irregularidades producto de que la calle, se observaba dispareja. No se superan los límites para un turno de 12 horas en ninguno de los ejes.

3.5.5.6 Calles Nuevas Gardilcic Campaña n°02 23 de Diciembre 2012

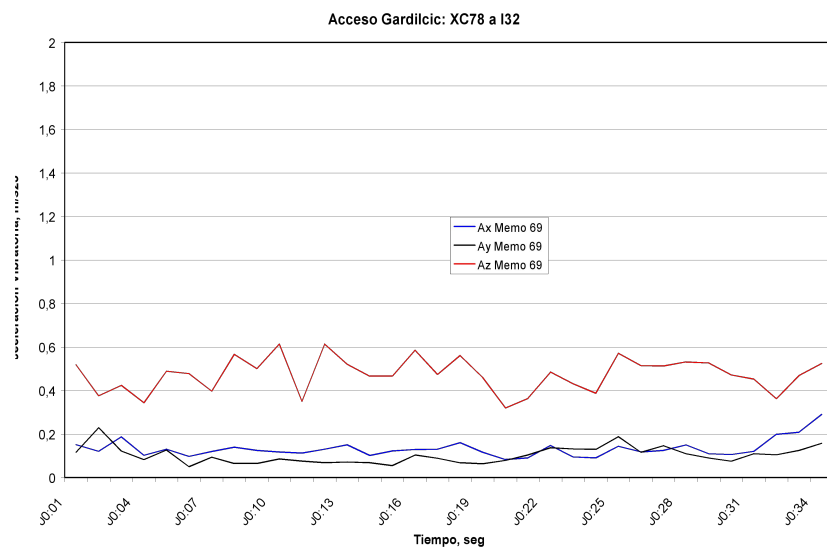


Figura 3.5.9: Gráfico aceleración vibratoria calles nuevas Gardilcic [Fuente: Cesmec S.A, 2012]

Prueba 69:

Ax: 0,14; Ay: 0,11; Az: 0,48 (m/s²)

Se presentan los ejes muy estables, x e y, mientras que en el eje z, se observan diversas irregularidades aunque sin grandes desplazamiento. No se superan los límites para un turno de 12 horas en ninguno de los ejes.

3.6 Cepillado de la superficie tramo de prueba Hormigón T-100 MPa Nv-17.

Esta labor consiste en realizar cuantos cepillados sean necesarios, para obtener el IRI teórico de 5,70 m/Km, hasta antes de retirar el hormigón de sacrificio T-100 de 2,5 cm de espesor, para realizar estas pruebas se entregaron 5000 m² de pistas en el Nv-17 con objeto de obtener datos tanto de rendimientos del equipo, desgaste de discos y problemas que pudieran surgir.

3.6.1 Actividades en Terreno.

Entre el 20 de Julio y el 07 Diciembre se comienza con el cepillado de las pistas en Nv-17 para el mejoramiento del IRI para esta labor se requieren los siguientes recursos.

Tabla 3.6.1: Recursos utilizados en cepillado de pistas.

Equipo	Cantidad
Cepilladora Pc-150	1
camioneta D/C	1
Mano de Obra	Cantidad
Prevencionista	1
Supervisor	1
Operador Cepilladora	1
Ayudante operador	2

Fuente: Elaboración propia, 2013



Figura 3.6.1: Equipo para cepillado PC-150 Diamond Grinding [Fuente: Remavesa, 2013]

3.6.2 Cepillado en mina subterránea.

Para realizar el cepillado en las pistas de la mina subterránea Codelco División Andina, se debió realizar una serie de modificaciones al equipo, para poder cumplir con los estándares de seguridad exigidos por Codelco, las que se mencionan a continuación:

- Confección de jaula de protección para el operador.
- Instalación de equipo *ansul* en cepilladora.
- Instalación de Focos Led principales y posteriores.
- Modificación del sistema de abastecimiento de agua de la cepilladora.

Una vez realizadas las modificaciones, se hizo ingreso a mina subterránea con cepilladora PC-150, para iniciar los trabajos de cepillado en el NV-17 en la galería GT-40, la cual tiene dimensiones de 4,5 m. de ancho, 3,5 m. de alto y 150 m de largo.

Los principales problemas que surgieron desde un comienzo, fueron la falta de iluminación, disponibilidad de calles para cepillar ya que estaban en uso, problemas de presión de agua, debido a que la cepilladora requiere de mínimo 6 psi de presión para funcionar de manera normal, debido a este problema, se debió cambiar constantemente de galerías ya que la mayoría presentaba el mismo problema, como se puede apreciar en la tabla 3.6.2, se contrataron 5000 m² de pistas para cepillar y los trabajos se extendieron por 4 meses, debido a los problemas nombrados anteriormente.

Si bien el cepillado, no es una labor compleja de realizar, en todo caso por ser primera vez que se trabaja con este tipo de equipo en la mina subterránea, se presentaron desafíos como la dureza de los hormigones de alta resistencia, las dimensiones del equipo, trabajo en altura (3200 m.s.n.m), nula iluminación y exceso de humedad, los cuales se fueron solucionando paso a paso, lográndose terminar de manera

satisfactoria el cepillado de las pistas sin antes dejar una serie de inquietudes a Codelco tanto en diseño de pistas como adecuación de las galerías para poder confeccionar un sistema eficiente de mantención de las pistas a través de cepillado de la superficie

3.6.3 Toma de datos en tramos de prueba.

INFORME RESUMEN DE RENDIMIENTOS CEPILLADO CODELCO DIVISION ANDINA

Tabla 3.6.2: cuadro resumen Rendimientos cepilladora

Cantidad Contratada M ²	5000,0
Cantidad Ejecutada M ²	6066,3
% de Avance	121,33

Promedio m ² /hr. Proyecto	82,84
Días efectivos Trabajados	22

Nivel	Fecha	Hora			Dimensiones		Sup.	Sup. Acum.	REND. M ² /hr	Prom. m ² /hr.
		Inicio	Termino	hr. Efectiva	LARGO	ANCHO				
17	12/07/2012	11:46	12:20	0,56	18,00	0,97	17,46	17,46	31,18	31,18
17	19/07/2012	14:00	15:00	1,00	55,30	0,97	53,64	71,10	53,64	66,39
17	19/07/2012	15:15	15:35	0,33	26,30	0,97	25,51	96,61	77,31	
17	19/07/2012	15:50	17:00	1,16	81,60	0,97	79,15	175,76	68,23	
17	20/07/2012	06:35	07:30	0,92	60,00	0,97	58,20	233,96	63,49	70,23
17	20/07/2012	08:25	09:00	0,58	49,70	0,97	48,21	282,17	82,64	
17	20/07/2012	09:10	10:25	1,25	97,70	0,97	94,77	376,94	75,82	
17	20/07/2012	10:30	11:00	0,50	30,40	0,97	29,49	406,43	58,98	
17	23/07/2012	10:47	13:08	2,35	160,40	0,97	155,59	562,02	66,21	65,46
17	23/07/2012	14:56	17:33	2,62	174,80	0,97	169,56	731,57	64,72	
17	24/07/2012	10:45	11:15	0,50	32,30	0,97	31,33	762,91	62,66	68,38
17	24/07/2012	11:20	11:45	0,42	32,30	0,97	31,33	794,24	74,60	
17	24/07/2012	12:06	12:45	0,65	39,70	0,97	38,51	832,75	59,24	
17	24/07/2012	12:47	13:17	0,50	39,70	0,97	38,51	871,25	77,02	
17	25/07/2012	10:17	12:50	2,55	73,50	1,94	142,59	1013,84	55,92	88,40
17	25/07/2012	13:20	14:45	1,42	104,00	0,97	100,88	1114,72	71,04	
17	25/07/2012	16:06	16:48	0,70	73,50	0,97	71,30	1186,02	101,85	
17	25/07/2012	17:00	17:30	0,50	30,50	0,97	29,59	1215,60	59,17	
17	25/07/2012	17:34	17:50	0,26	30,50	0,97	29,59	1245,19	113,79	
17	25/07/2012	17:54	18:08	0,23	30,50	0,97	29,59	1274,77	128,63	
17	31/07/2012	14:28	15:39	1,18	72,1	0,97	69,94	1344,71	59,27	109,13
17	31/07/2012	15:47	16:27	0,67	72,1	0,97	69,94	1414,65	104,38	
17	31/07/2012	16:31	17:04	0,55	72,1	0,97	69,94	1484,59	127,16	
17	31/07/2012	17:08	17:37	0,48	72,1	0,97	69,94	1554,52	145,70	
17	09/08/2012	11:44	13:05	1,35	96,6	0,97	93,702	1648,22	69,41	64,55
17	09/08/2012	13:15	13:35	0,33	12	0,97	11,64	1659,86	35,27	
17	09/08/2012	14:45	15:45	1	85,6	0,97	83,032	1742,90	83,03	
17	09/08/2012	15:55	17:10	1,25	97,6	0,97	94,672	1837,57	75,74	
17	09/08/2012	17:30	19:05	1,58	96,6	0,97	93,702	1931,27	59,31	
17	21/08/2012	11:05	12:05	1	73,5	0,97	71,30	2002,57	71,30	86,58
17	21/08/2012	12:15	13:05	0,83	73,5	0,97	71,30	2073,86	85,55	
17	21/08/2012	13:10	13:25	0,25	30,5	0,97	29,59	2103,45	118,34	
17	21/08/2012	13:30	13:55	0,42	30,5	0,97	29,59	2133,03	71,00	
17	21/08/2012	14:05	14:35	0,50	73,5	0,97	71,30	2204,33	142,59	
17	21/08/2012	14:40	15:30	0,83	73,5	0,97	71,30	2275,62	85,55	
17	21/08/2012	15:40	16:00	0,33	30,5	0,97	29,59	2305,21	88,76	
17	21/08/2012	16:05	16:20	0,25	30,5	0,97	29,59	2334,79	118,34	
17	28/08/2012	09:10	10:45	0,58	52,5	0,97	50,93	2385,72	87,35	87,66
17	28/08/2012	10:55	11:26	0,52	52,5	0,97	50,93	2436,64	97,93	
17	28/08/2012	11:37	12:10	0,55	52,5	0,97	50,93	2487,57	92,59	
17	28/08/2012	12:15	12:57	0,7	52,5	0,97	50,93	2538,49	72,75	
17	11/09/2012	06:30	07:33	1,05	90,0	0,97	87,30	2625,79	83,14	82,02
17	11/09/2012	07:45	08:50	1,08	90,0	0,97	87,30	2713,09	80,83	

CAPITULO 3: IMPLEMENTACIÓN DE LA SOLUCIÓN

17	11/09/2012	09:00	10:06	1,1	90,0	0,97	87,30	2800,39	79,36	113,45
17	11/09/2012	10:17	11:19	1,03	90,0	0,97	87,30	2887,69	84,76	
17	12/09/2012	08:37	08:53	0,27	30,48	0,97	29,57	2917,26	109,52	
17	12/09/2012	09:00	09:17	0,29	30,48	0,97	29,57	2946,83	101,97	
17	12/09/2012	09:30	09:44	0,23	30,48	0,97	29,57	2976,40	128,57	
17	12/09/2012	09:57	10:13	0,26	30,48	0,97	29,57	3005,97	113,73	82,12
17	26/09/2012	08:25	08:51	0,44	37,5	0,97	36,38	3042,35	82,67	
17	26/09/2012	09:03	09:32	0,48	37,5	0,97	36,38	3078,72	75,78	
17	26/09/2012	09:44	10:12	0,46	37,5	0,97	36,38	3115,10	79,08	
17	26/09/2012	10:25	10:49	0,4	37,5	0,97	36,38	3151,47	90,94	
17	27/09/2012	09:05	09:48	0,72	62,5	0,97	60,63	3212,10	84,20	85,17
17	27/09/2012	10:15	10:56	0,68	62,5	0,97	60,63	3272,72	89,15	
17	27/09/2012	11:21	12:05	0,74	62,5	0,97	60,63	3333,35	81,93	
17	27/09/2012	12:22	13:05	0,71	62,5	0,97	60,63	3393,97	85,39	
17	16/10/2012	08:20	08:31	0,19	25,25	0,97	24,49	3418,46	128,91	120,12
17	16/10/2012	08:45	08:58	0,22	25,25	0,97	24,49	3442,96	111,33	
17	17/10/2012	09:10	10:43	1,55	121	0,97	117,37	3560,33	75,72	78,31
17	17/10/2012	11:02	12:39	1,61	121	0,97	117,37	3677,70	72,90	
17	17/10/2012	12:52	13:33	0,68	60,5	0,97	58,69	3736,38	86,30	
17	18/10/2012	08:30	10:16	1,77	131,13	0,97	127,19	3863,57	71,86	73,27
17	18/10/2012	10:25	12:05	1,8	131,13	0,97	127,19	3990,76	70,66	
17	18/10/2012	12:22	14:02	1,67	131,13	0,97	127,19	4117,95	76,16	
17	18/10/2012	15:00	16:33	1,71	131,13	0,97	127,19	4245,15	74,38	
17	23/10/2012	08:35	09:27	0,87	72,5	0,97	70,325	4315,47	80,83	90,12
17	23/10/2012	09:40	10:25	0,75	72,5	0,97	70,325	4385,80	93,77	
17	23/10/2012	10:42	11:22	0,66	72,5	0,97	70,325	4456,12	106,55	
17	23/10/2012	11:36	12:22	0,77	72,5	0,97	70,325	4526,45	91,33	
17	23/10/2012	12:35	13:29	0,9	72,5	0,97	70,325	4596,77	78,14	
17	25/10/2012	09:05	10:40	1,59	125	0,97	121,25	4718,02	76,26	74,48
17	25/10/2012	10:55	12:32	1,62	125	0,97	121,25	4839,27	74,85	
17	25/10/2012	12:42	14:23	1,68	125	0,97	121,25	4960,52	72,17	
17	25/10/2012	15:15	16:48	1,55	125	0,97	121,25	5081,77	78,23	
17	25/10/2012	17:05	18:48	1,71	125	0,97	121,25	5203,02	70,91	
17	30/10/2012	08:25	08:53	0,47	46	0,97	44,62	5247,64	94,94	93,76
17	30/10/2012	09:07	09:38	0,51	46	0,97	44,62	5292,26	87,49	
17	30/10/2012	09:50	10:16	0,44	46	0,97	44,62	5336,88	101,41	
17	30/10/2012	10:28	10:59	0,52	46	0,97	44,62	5381,50	85,81	
17	30/10/2012	11:10	11:37	0,45	46	0,97	44,62	5426,12	99,16	
17	31/10/2012	08:12	08:18	0,26	32	0,97	31,04	5457,16	119,38	119,34
17	31/10/2012	08:21	08:33	0,2	32	0,97	31,04	5488,20	155,20	
17	31/10/2012	08:42	08:59	0,29	32	0,97	31,04	5519,24	107,03	
17	31/10/2012	09:13	09:32	0,31	32	0,97	31,04	5550,28	100,13	
17	31/10/2012	09:42	09:58	0,27	32	0,97	31,04	5581,32	114,96	
17	15/11/2012	09:05	10:25	1,33	100	0,97	97,00	5678,32	72,93	72,31
17	15/11/2012	10:38	12:02	1,4	100	0,97	97,00	5775,32	69,29	
17	15/11/2012	12:12	13:37	1,42	100	0,97	97,00	5872,32	68,31	
17	15/11/2012	14:30	15:46	1,26	100	0,97	97,00	5969,32	76,98	
17	15/11/2012	16:02	17:21	1,31	100	0,97	97,00	6066,32	74,05	

Fuente: Elaboración propia, 2013

3.6.4 Medición de desgaste de Discos Cepilladora PC-150 en HRFA.

Tabla 3.6.3: Vida útil discos

VIDA DISPONIBLE DISCOS DIAMOND PC-150					
Diámetro de nuevo (pulg)		12,540	Diámetro mínimo para cambio(pulg)		11,950
					Diámetro disponible (pulg) 0,590
Datos históricos de m ² cepillados, en una vida de discos	227.759,000	Diam. Prom. Actual en (pulg)		Diámetro disponible(pulg)	m ² disponibles
		12,466		0,516	199.192,617

Fuente: Remavesa, 2013

3.6.5 Medición de desgaste de Discos Cepilladora PC-6000 en H-35

Tabla 3.6.4: Vida útil discos

VIDA DISPONIBLE DISCOS DIAMOND PC-6000					
Diámetro de nuevo (pulg)		18,825	Diámetro mínimo para cambio(pulg)		18,200
					Diámetro disponible (pulg) 0,625
Datos históricos de m ² cepillados, en una vida de discos	153.909	Diam. Prom. Actual en (pulg)		Diámetro disponible(pulg)	m ² disponibles
		18,224		0,024	5.910

Fuente: Remavesa, 2013

Como se puede apreciar, el desgaste de los discos es menor con el HRFA T-100 MPa que con el hormigón normal H-35 MPa, debido al menor tamaño del árido utilizado, ya que el árido, es el que le da la dureza al hormigón, lo lógico sería pensar que el acero incorporado al hormigón podría producir un mayor desgaste a los discos, pero queda demostrado al comparar ambos desgastes, donde se aprecia un aumento en la vida útil de los discos de 78.850 m² al cepillar el HRFA con respecto al hormigón H-35 MPa,

esto significa un aumento del 48%, además se hizo la comparación en los rendimientos obtenidos en el cepillado de hormigones carreteros H-35 MPa de 60 m²/hora promedio

y HRFA T-100 MPa en mina subterránea con un rendimiento promedio de 83 m²/hora promedio, arrojando mayores rendimientos en este último.

Estos dos indicadores demuestran una disminución en el costo de operación del equipo cepillador, siendo más rentable cepillar HRFA T-100 MPa debido menor desgaste de discos y mayores m² cepillados por hora.

3.6.6 Medición de IRI durante cada Cepillado en tramo de prueba Nv-17

Durante el proceso de cepillado se realizó la medición del IRI, en cada pasada del equipo para poder verificar, las mejoras que se iban obteniendo, en este caso, debido a que el pavimento de prueba estaba conformado con una capa de T-100 MPa de 2,5 cm, de espesor y con el segundo cepillado, se constato que debido al alto valor del IRI inicial, se estaba rebajando la totalidad del hormigón T-100 MPa, se decidió terminar con el cepillado, ya que se comenzaría a deteriorar el hormigón estructural, pero se pudo apreciar que con un IRI inicial de 8,56 m/Km. se logro disminuir el IRI en 2,13 cm/m llegando a un IRI de 6,43 m/Km, lo que significa una enorme mejora en la calidad del pavimento.

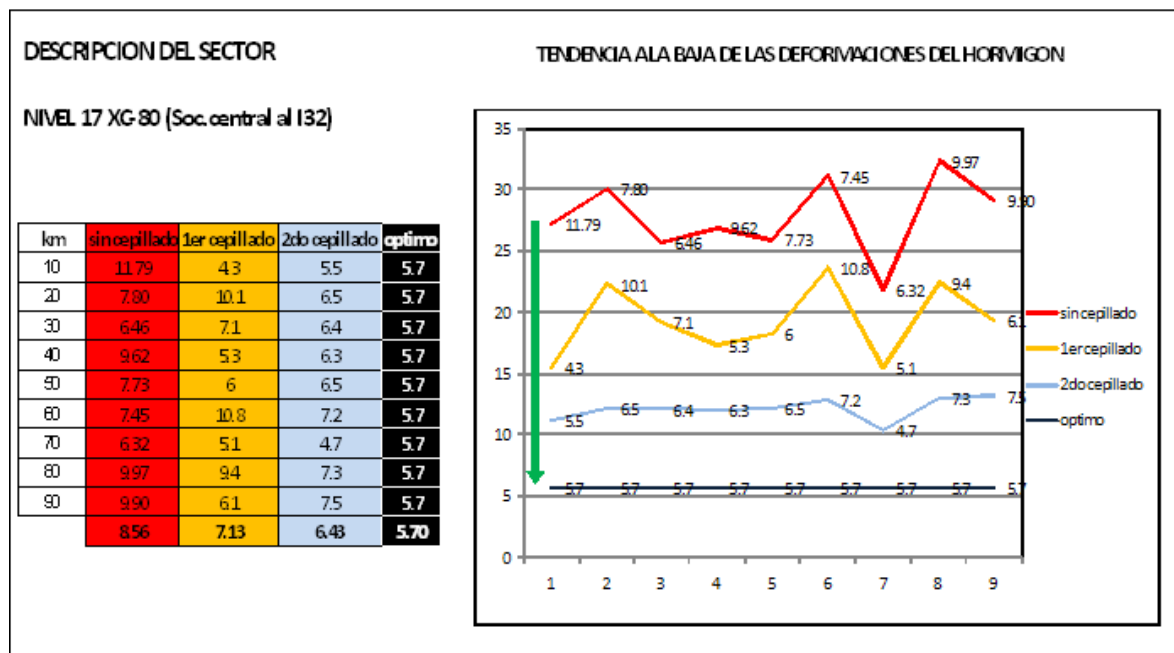


Figura 3.6.2: Medición de IRI en tramo de prueba durante el cepillado [Fuente: Apsa, 2012]

En la figura 3.6.2 se puede apreciar la mejora obtenida, si bien no se pudo llegar al IRI teórico definido al inicio, de 5,7 m/Km esto nos demuestra que el cepillado es una buena solución a la baja duración de las pistas de transporte y producción *LHD*, sería necesario hacer cambios en los espesores de los hormigones nuevos, para poder

contar con un mayor espesor para realizar sucesivos cepillados a medida que el IRI aumente.

Capítulo 4

Conclusiones y Recomendaciones.

4.1 Conclusiones

- La aplicación del cepillado en la mina subterránea Codelco División Andina, resultó bastante interesante a pesar de no haber llegado a las metas que se propusieron para este trabajo, desde el punto de vista de dar conocer esta técnica en un área no aplicado como es la minería subterránea y como solución a la baja duración de las pistas.
- El cepillado resultó ser una buena solución, a la baja duración de las pistas demostrándose en las mediciones de IRI las mejoras logradas, especialmente en lo relacionado con las jornadas de los conductores de los equipos.
- Las mediciones de IRI y aceleración vibratoria demuestran la baja calidad en que se encuentran las pistas al interior de la mina, siendo comparables solo con caminos no pavimentados.
- La medición del IRI en los pavimentos nuevos en la mina subterránea, nos demuestra las condiciones adversas de trabajo a las que están expuestos los trabajadores obteniendo un IRI 5,7.
- El deterioro se manifiesta en la totalidad de los tramos, observándose ondulaciones y escalonamiento evidentes, producto del alto tonelaje de los equipos y los esfuerzos que le imprimen a la carpeta de rodado.
- Las condiciones para realizar el cepillado no fueron las optimas, debido a la nula iluminación, bajas presiones de agua y gran cantidad de barro acumulado en las pistas, lo que dificulta en gran medida la técnica del cepillado de la superficie.
- La falta de un programa de trabajo por parte de Codelco, extendió el cepillado de las pistas por más del tiempo presupuestado generando un mayor costo de éste.
- El HRFA T-100 resultó ser más conveniente para cepillar, tanto por el menor desgaste de los discos del equipo, como también mayores rendimientos diarios comparados con cepillados de hormigones normales. Se debe seguir investigando respecto a las exigencias mínimas de la solución de desgaste.
- El hormigón de sacrificio reforzado con fibras de acero T-100 colocado por Codelco en tramos de prueba resultó ser de muy bajo espesor para poder obtener el IRI teórico de 5,7.

- La cepilladora PC-150 *Diamond Grinding* resultó ser adecuada, debido a sus dimensiones para el trabajo en las galerías de forma abovedada.
- Las mediciones de aceleración vibratoria indicaron que las jornadas de trabajo en el nivel 17 se pueden efectuar con normalidad con turnos de 12 horas, no así, en el nivel 16 donde las jornadas máximas son de 3,5 horas.
- Al comparar las mediciones de IRI y aceleración vibratoria, los resultados son concordantes, en el sentido que mayor IRI mayor es la vibración y por lo tanto las jornadas de trabajo se reducen aumentando los costos en mayor contingente para conducción de equipos.

4.2 Recomendaciones

- Para la óptima realización del cepillado de las pistas antiguas, se recomienda instalar un sistema provisorio de iluminación aérea en las galerías, que requieran cepillado, además de la limpieza del barro y material a través de barredoras.
- Debido al problema de presiones de agua encontrado en las galerías de transporte, se recomienda la instalación de una bomba centrífuga en la cepilladora PC-150 y así generar la presión requerida de 6 [PSI] como mínimo.
- Debido a que el Hormigón de sacrificio T-100 reforzado con fibras de acero, resultó ser económico para el cepillado, se recomienda modificar el diseño actual de pavimento y darle un mayor espesor al HRFA T-100, para así tener un pavimento al cual cepillar en varias ocasiones.
- Se recomienda para los nuevos pavimentos un espesor mínimo de 15 cm del hormigón tipo HRFA T-100.
- Se recomienda confeccionar un programa de medición de IRI mínimo, en forma semestral en las pistas de transporte y producción LHD, para llevar un indicador de aumento del IRI y así poder confeccionar un programa de mantenimiento a través del cepillado.
- Se recomienda realizar encuestas de confort a los operadores de equipos, que transitan por las pistas de transporte y producción LHD, para así determinar en conjunto con las mediciones de IRI, cuando iniciar el proceso de mantención preventiva a través del cepillado.
- Debido a que la solución del cepillado es efectiva, se recomienda hacer un análisis económico de los costos de los nuevos espesores más el cepillado v/s los costos de mantención de los equipos, aumento en los rendimientos y menor cantidad de operadores por jornadas de trabajo normales (12 horas).

Futuras líneas de investigación

- Como futura línea de investigación, se propone realizar un análisis económico de los costos de mantención a través de cepillado de pistas v/s aumento de rendimientos, costos de mantención de equipos y disminución de la dotación de operadores.
- Otra futura línea de investigación consiste en la evaluación económica de los costos actuales del diseño de pistas v/s el hormigón tipo HRFA T-100, en espesor de 15 cm.

Bibliografía

Almonacid, M. y Gahona, C. (2002). Sistema de Administración del Mantenimiento. En Dirección de Vialidad (Ed.), 6° Congreso Internacional PROVIAL. Chillán, Chile: Dirección de Vialidad.

Al-Omari, B. y Darter, M. (1995). Effect of Pavement Deterioration Types on IRI and Rehabilitation. Transportation Research Record, 1505. 57-65

"Análisis de la techada del Cepillado", International Grooving and Grinding Association, 1990.

ASTM C 1018-85. "Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam with Third-Point Loading)". 1986 Annual Book of ASTM Standards, Section 4, Volume 04.02, pp. 650-657.

AASHTO (1993). AASHTO guide for design of pavement structures. Washington D. C., EE.UU., AASHTO.

Darter, M.I., Carpenter, S.H., Harrin, M., Barenberg, E.J., Dempsey, B.J., Thomson, M.R., Smith, R.E., y Synder M.B., Técnicas para la Rehabilitación de Pavimentos, Participants Notebook, National Highway Institute/Federal Highway Administration, revisión de 1987.

D.S. N° 594/99 del Ministerio de Salud aprueba reglamento sobre condiciones sanitarias y ambientales básicas en los lugares de, Publicado en el Diario Oficial 29 de Abril de 2000 Párrafo III De los agentes físicos DELRUIDO

De Solminihac, H. (1987). Metodología estadística para el estudio y evaluación de aspectos técnicos en la construcción. Revista de Ingeniería de Construcción, Vol 2 (1). 21-33.

De Solminihac, H. Salsilli, R., Köhler, E. y Bengoa, E. (2003). Analysis of pavement serviceability for the AASHTO design method: the chilean case. The Arabian Journal for Science and Engineering. Vol 28 (2B), 143-160.

Dewan S. y Smith, R. (2002). Estimating International Roughness Index from Pavement Distresses to Calculate Vehicle Operating Costs for the San Francisco Bay Area. Transportation Research Record, 1816 (1), 65-72.

Eaton, R. y Beaucham, R. (1992). Unsurfaced Road Maintenance Management. Virginia, EE.UU.: CRREL.

Gillespie, T., (1992). Everything you always wanted to know about the IRI, but were afraid to ask!. (sin Ed.), 4th Annual Road Profile Users Group Meeting. Nebraska, EE.UU.

Granlund, J. (2000). Whole-body vibration when riding on rough roads. Borlänge, Suecia: Swedish National Road Administration.

"Guía para Inspecciones en Terreno de la Restauración de Pavimentos de Hormigón", Federal Highway Administration, Demonstration Projects Program, Diciembre 1987.

"Guía AASHTO para el Diseño de Estructuras de Pavimento" American Association of State Highway and Transportation Officials, 1987.

"Guía de Especificaciones para Construcción de Carreteras 1988", American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C., 1988.

Hudson, W.R., Haas, R., Uddin, W., (1997). Infrastructure Management. Nueva York, EE.UU.: Mc Graw Hill.

HATTON M. "Estudio Experimental de la Distribución y Orientación de las Fibras en Hormigón Reforzado con Fibras de Acero". Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile.

D.S. N° 594/99 DEL MINSAL, TÍTULO IV, PARRAFO 3° instructivo para la aplicación del agente físico- vibraciones.

JOHNSTON COLIN D. "Steel Fiber Reinforced Concrete Pavement Trials". Concrete International, Dec. 1984, pp. 39-43.

Jones, D., Paige-Green, P. (2000). Draft TMH12 - Pavement Management Systems: Standard Visual Assessment, Manual for Unsealed Roads. Pretoria, Sudáfrica: Committee of Land Transport Officials.

Lee, D., Chatti, K. y Baladi, G (2002). Use of Distress and Ride Quality Data to Determine Roughness Thresholds for Smoothing Pavements as a Preventive Maintenance Action. Transportation Research Record, 1816 (1), 43-55.

Lin, J., Yau, J., Hsiao, L. (2003). Correlation analysis between International Roughness Index (IRI) and Pavement Distress by Neural Network. Chungli, Taiwan. Presentado en 82th TRB, Washington, D.C., EE.UU.

Loizos A. y Plati C. (2002). Road Roughness Measured by Profilograph in Relation to Users's Perception and the Need for Repair: A Case Study. En CD. .International Conference on Pavement Evaluation, Roanoke, Virginia, EE.UU.

Márquez, J. (2006). Desarrollo de una metodología para determinar el estado de pavimentos y bermas. Tesis de maestría, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.

MOP (2000). Manual de Carreteras, Volumen 7: Mantenimiento Vial. Santiago, Chile: Autor.

MOP (2007). Red Vial Nacional: Dimensionamiento y Características. Santiago, Chile: Autor.

POBLETE M. "Cuantificación del Alabeo en Losas de Pavimento de Hormigón Simple sin Pasadores". Memorias IX Conferencia Interamericana sobre Tecnología de Materiales. Santiago – Chile, 1987.

Roman, R., Darter, M.I., Synder, M.B., "Procedimientos para la determinación del momento óptimo para restaurar pavimentos de hormigón con juntas". General Electric Company/American Concrete Pavement Association, 1985.

"Revisión del Comportamiento de las Restauraciones de Pavimentos de Hormigón", Pavement Division ami Demo Projects Division, Federal Highway Administration,

RAMAKRISHNAN V., OBERHING G. Y TATNALL P., "Flexural Fatigue Strength of Steel Fiber Reinforced Concrete". Fiber Reinforced Concrete - Properties and Applications, SP-105, American Concrete Institute, Detroit, 1987, pp. 225-245.

Synder, M.B., Reiter, M.J., Hall, K.T., Darter, M.I., "Rehabilitación de Pavimentos de Hormigón, Volumen I Técnicas de Reparación y Rehabilitación" Federal Highway Administration, Report DTFH-61-85-C-00004, 1987.

Sayers, M., Gillespie, T., y Queiroz, C. (1986). The International Road Roughness Experiment. Washington, EE.UU.: The World Bank.

Schliessler, A. y Bull, A. (2004). Caminos: un nuevo enfoque para la gestión y conservación de redes viales. Santiago, Chile: CEPAL.

The World Bank (2005). Surfacing Alternatives for Unsealed Rural Roads. Washington, EE.UU.: Autor.103

Thenoux, G. y Halles, F. (2002). Metodología simplificada de priorización de conservación de pavimentos a nivel de red. En Dirección de Vialidad (Ed.), 6º Congreso Internacional PROVIAL. Chillán, Chile: Dirección de Vialidad.

"Un camino nivelado tiene un mejor rodaje y dura más", International Grooving and Grinding Association, 1989.

Van Zyl, G., Henderson, M. y Uys, R. (2007). Applicability of Existing Gravel-Road Deterioration Models Questioned. Journal of the Transportation Research Board, 1989 (1), 217-225.

Watanatada, T.; Clell, H. y William, P. (1987). The Highway Design and Maintenance Standards Model. Volume 1, Description of the HDM-III Model. Washington D.C., EE.UU.: The World Bank.

Anexo Fotográfico

Cepillado en mina subterránea Codelco División Andina.

Ingreso a Mina subterránea



Cepillado en galerías de transporte







